APUNTES DE ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN Y EL URBANISMO (II)

por

CÉSAR DÍAZ SANCHIDRIÁN



CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-51-02

APUNTES DE ACÚSTICA EN LA EDIFICACIÓN Y EL URBANISMO (II)

por

CÉSAR DÍAZ SANCHIDRIÁN

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-51-02

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA

0 VARIOS
1 ESTRUCTURAS
2 CONSTRUCCIÓN
3 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
4 TEORÍA
5 GEOMETRÍA Y DIBUJO
6 PROYECTOS
7 URBANISMO
8 RESTAURACIÓN

NUEVA NUMERACIÓN

2 Área
51 Autor
02 Ordinal de cuaderno (del autor)

Apuntes de acústica en la edificación y el urbanismo (II)

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Composición y maquetación: Daniel Álvarez Morcillo.
CUADERNO 123.01 / 2-51-02
ISBN: 84-9728-021-0 (obra completa)
ISBN: 84-9728-023-7 (Apuntes II)
Depósito Legal: M-3383-2002

ÍNDICE

3.- LA PERCEPCIÓN DEL SONIDO

3.1.- INTRODUCCIÓN

La psicoacústica estudia la relación entre los estímulos provocados por las ondas sonoras y la interpretación que de ellos hace el cerebro. Los primeros trabajos en este campo de la acústica fueron realizados por Fechner y Weber alrededor de 1860.

El proceso de recepción de una señal y su posterior interpretación por el sentido de la audición se divide en tres partes: estímulo, excitación y sensación. El estímulo es la onda sonora que al ser captada por el oído externo pone en vibración la membrana del tímpano. La excitación es el proceso mediante el cual los órganos del oído medio transportan la perturbación desde el tímpano al oído interno, donde se inicia el proceso neuronal. La sensación es la impresión que la excitación produce en el cerebro.

El funcionamiento mecánico del oído se conoce bastante bien, sin embargo la percepción del sonido implica un complicado proceso neurológico de información, que aún no se conoce perfectamente.

En el estudio de las ondas sonoras, se demuestra que una onda sonora monocromática se caracteriza por su frecuencia y las variaciones de la amplitud de la presión acústica. A estas magnitudes físicas, en principio, se les asocian sensaciones distintas. Aparte de sus propiedades físicas, un sonido se puede caracterizar por las siguientes propiedades subjetivas: la sonoridad, la altura y el timbre.

La sensación de sonoridad o intensidad subjetiva, es la propiedad de la sensación auditiva que permite clasificar a los sonidos en más o menos fuertes o débiles. Está asociada con la presión acústica, a mayor presión, el sonido parece más sonoro. También depende ligeramente de la frecuencia.

La altura o sensación de agudeza, es la propiedad de un sonido por la que es considerado más grave o más agudo. Está asociada con la frecuencia, depende en parte también de la presión y forma de la onda.

El timbre es la propiedad de la sensación auditiva que permite distinguir entre dos tonos de la misma intensidad y frecuencia fundamental, pero de diferente forma de onda, también depende parcialmente de la presión y de la frecuencia fundamental.

3.2.- EL OIDO HUMANO

Es un órgano capaz de transformar señales acústicas en nerviosas.El oído consta básicamente de tres partes principales:
El oído externo, que recoge el sonido y lo convierte en movimiento vibratorio del tímpano. Consta del pabellón auditivo externo y el canal auditivo, este tiene de 0,5 a 0,7 cm de diámetro y de 2,5 a 2,7 cm de largo, funciona como un tubo cerrado por un extremo y desempeña el papel de un resonador. El aire en su interior entra en vibración con una frecuencia propia comprendida entre 2.000 y 5.000 Hz, produciendo una amplificación del nivel sonoro entre 5 y 10 dB. El tímpano separa el oído externo del medio.

El oído medio está lleno de aire y constituido por la caja del tímpano y la cadena de huesecillos. Tiene un volumen aproximado de 2 cm^3 y actúa como un acoplador de impedancias. Consta de un mecanismo formado por tres huesecillos que transmiten la vibración al oído interno. El oído medio transmite al oído interno una presión aproximadamente 20 veces mayor que la que recibe.

El oído interno consta de los canales semicirculares, controlan el equilibrio, y de la cóclea, esta tiene una configuración en forma de caracol, que está llena de un líquido llamado perilinfa. La membrana basilar divide longitudinalmente a la cóclea. Como respuesta a un estímulo acústico el fluido de la cóclea se perturba, esto deforma la membrana basilar en cuya cara superior se localizan unas 25.000 células ciliadas muy sensibles, que detectan la deformación y la transforman en impulsos nerviosos que son transmitidos al cerebro. La respuesta de la membrana basilar a sonidos de diferentes frecuencias está muy influenciada por sus propiedades mecánicas. Los sonidos de frecuencias diferentes producen desplazamientos máximos en lugares diferentes de la membrana basilar. La mayoría de los trabajos pioneros de modelos de vibración a lo largo de la membrana basilar fueron realizados por Von Bekesy, 1947. Trabajos recientes han mostrado que las vibraciones de la membrana basilar no son lineales.

Al oído interno le llega también energía sonora a través de los huesos del cráneo(conducción ósea). Oímos en parte nuestra propia voz debido a esta forma de transmisión.

Una exposición prolongada a niveles de presión sonora elevados origina daños en las células ciliadas, produciendo un daño progresivo en la capacidad auditiva. Al comienzo, el deterioro de unas cuantas células no es apreciable, pero a medida que el proceso avanza, al cerebro le es cada vez más difícil compensar la perdida de información. Las palabras llegan a confundirse entre si, la conversación y el ruido de fondo no se distinguen, etc. Cuando la persona afectada es consciente de la perdida de audición, el daño suele ser importante e irreparable. La perdida de audición debida a la exposición al ruido suele ser mayor en la zona de altas frecuencias.

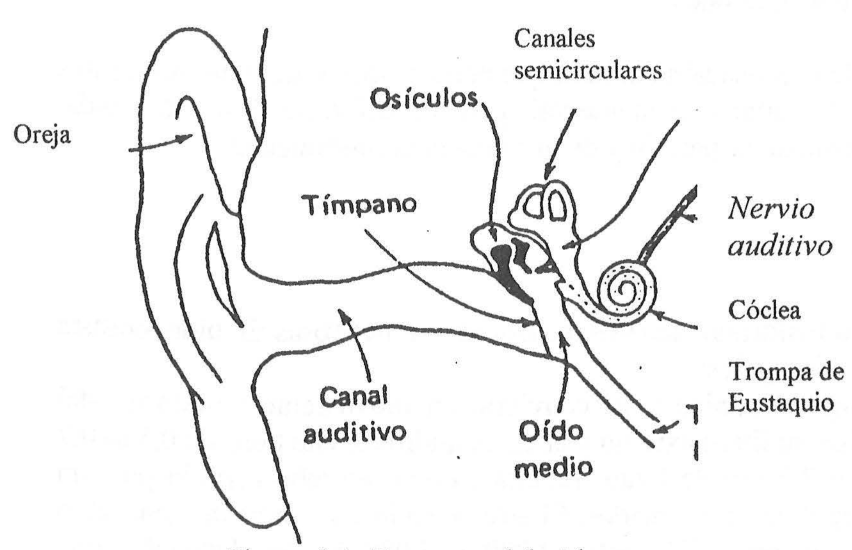


Figura 3.1: Esquema del oído

3.3.- LA RESPUESTA AUDITIVA

El oído humano presenta una gama muy amplia de frecuencias y presiones sonoras en la que puede recibir información útil. Se acepta que el rango audible de frecuencias, para una persona joven con el oído sano, está en promedio entre 20 Hz y 20 kHz, pero es mas sensible entre 1000 – 5000 Hz. El extremo superior del rango audible disminuye con la edad, siendo el más afectado por la exposición al ruido. Esta agudeza auditiva disminuye con la edad, personas mayores de 40 años difícilmente perciben frecuencias superiores a 15 kHz. También puede soportar presiones sonoras desde 2.10^{-5} Pa hasta 200 Pa, las primeras, a frecuencias próximas a 1 kHz producen un desplazamiento de la membrana del tímpano del orden de 10^{-11} m.

Se llama *umbral de audibilidad a una frecuencia dada* al nivel de presión sonora mínimo capaz de producir una sensación auditiva en ausencia de otros sonidos externos. Aparte de la frecuencia, también depende de la forma en que se presente la señal al oyente y del lugar donde se mide el nivel de presión sonora.

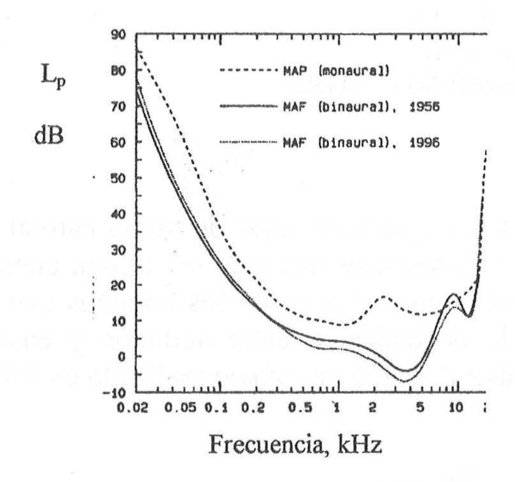


Figura 3.2: Mínimo nivel sonoro audible en función de la frecuencia.

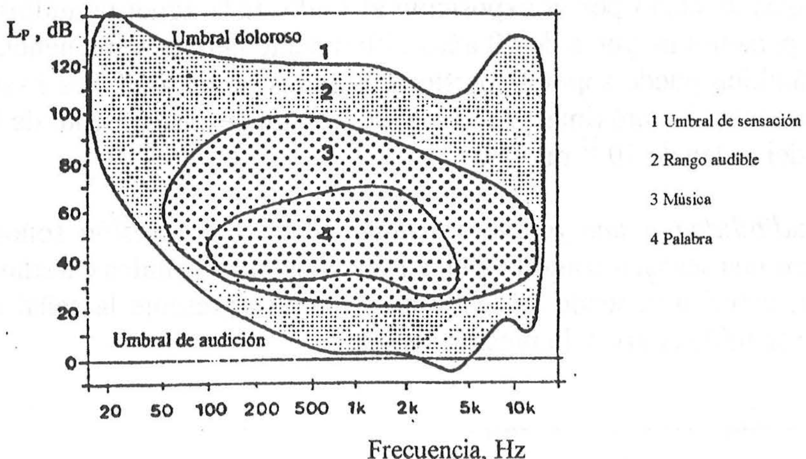
La figura 3.2 muestra el mínimo nivel sonoro audible en función de la frecuencia. La curva sólida muestra el campo audible mínimo (MAF) para audición binaural publicado por Robinson y Dadson (1956). La curva de puntos muestra el campo audible mínimo publicado por la norma ISO 389-7, 1996. La curva rayada muestra la presión mínima audible (MAP) para audición monoaural.

Un oyente medio experimenta malestar apreciable cuando se le somete, en un campo sonoro libre, a niveles de presión sonora por encima de los 120 dB, la sensación táctil o de cosquilleo se produce a los 130 dB, los huesecillos vibran con tanta amplitud que chocan contra la pared del oído medio, y alrededor de 140 dB se alcanza la sensación de dolor. Cuando los niveles de presión sonora alcanzan los 160 dB los daños son inmediatos y permanentes, pudiéndose llegar a la sordera total.

Si una persona se expone a un ruido por encima de un determinado nivel sonoro y luego se elimina el ruido, su audición suele empeorar (el nivel de audición suele aumentar). Se llama *desplazamiento del umbral de audición*, se expresa en dB, a la diferencia entre los niveles del umbral de audición medidos antes y después de la exposición al ruido. El

desplazamiento del umbral puede ser temporal o permanente según recupere o no su nivel umbral anterior. El desplazamiento umbral aumenta con el nivel de presión sonora y con el tiempo de exposición.

La figura 3.3 muestra los rangos de audibilidad y umbrales.



Frecuencia, Hz

Figura 3.3: Rangos de audibilidad y umbrales

Se llama *presbiacusia* a la perdida de audición que tiene lugar de forma natural con el aumento de la edad. La presbiacusia puede comenzar antes de los treinta años sobre todo a altas frecuencias. La perdida de audición es mayor en los hombres que en las mujeres. En las figura 3.4 se muestra la dependencia entre audición y edad para hombres y mujeres no expuestas a ruido laboral, según un trabajo realizado en 1.967 por A. Spoor.

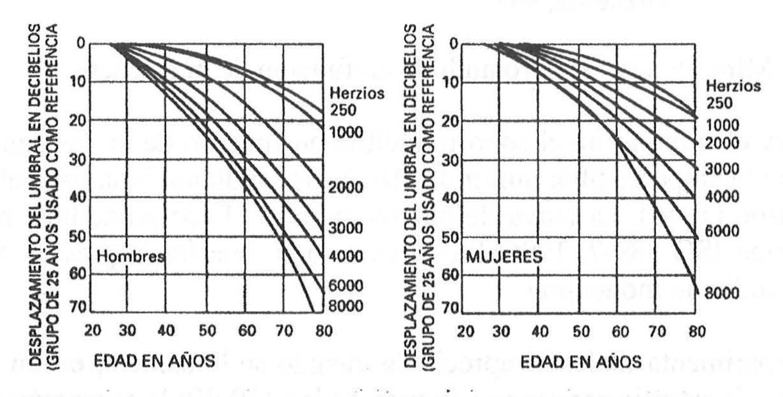


Figura 3.4: Dependencia entre audición y edad para hombres y mujeres.

La figura 3.5 muestra los resultados obtenidos por W. Taylor en 1.965 sobre la mediana estimada de los desplazamientos permanentes de umbral inducidos por el ruido a distintas frecuencias, en función de periodos crecientes de exposición. La exposición a ruidos tiende a producir las mayores pérdidas de audición entre los 4.000 y 6.000 Hz.

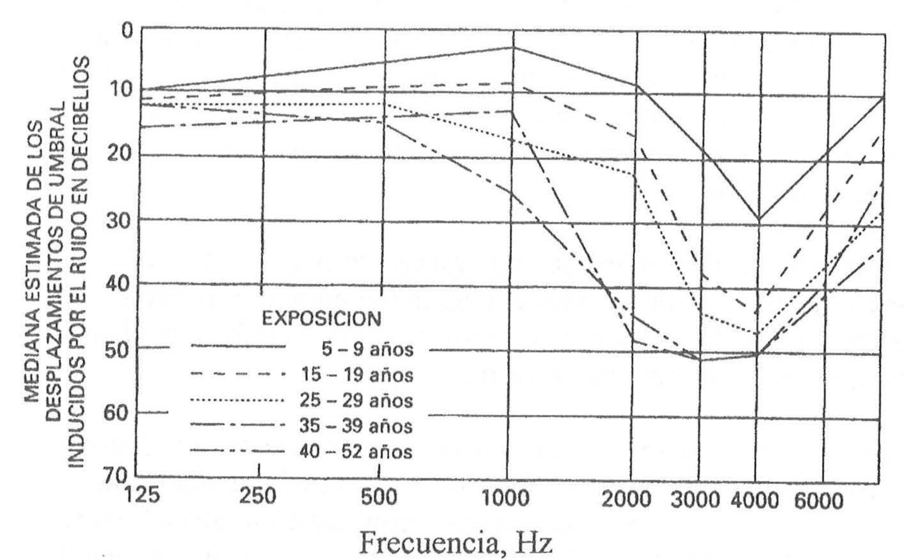


Figura 3.5: Desarrollo de la perdida de audición inducida por la exposición al ruido

3.4.- SONORIDAD Y NIVEL DE SONORIDAD

Las sensaciones humanas no son medibles directamente, sin embargo si lo son las magnitudes físicas que las producen, por ello es necesario conocer la relación entre la magnitud física y la sensación.

Los estudios de Weber y Fechner demostraron que las sensaciones no se perciben hasta que el excitante no alcanza un cierto valor umbral de sensación y que únicamente se aprecian variaciones en la intensidad del excitante hasta que este ha modificado su intensidad en un cierto porcentaje. Estos resultados experimentales expresados matemáticamente se conocen como ley de Weber-Fechner, que determina la relación entre la sensación, S, y la intensidad excitante, I, con referencia a la intensidad umbral,I_0 .Esta ley psicológica general se escribe:

$$S = \log\frac{I}{I_0} \quad \text{, la unidad de medida es el Bel} \qquad [3.1]$$

Experimentalmente, en diversos laboratorios se ha comprobado que las variaciones de la sensación sonora son proporcionales a una potencia del estímulo, en contradicción con ley de Weber-Fechner. Según Stevens la ley psicológica general se escribe:

$$S = k\,(I - I_0)^{0,3} \qquad [3.2]$$

donde k es una constante que depende del objeto y las unidades utilizadas. La sonoridad percibida de un sonido dado es proporcional a su intensidad elevada a 0,3.

La sonoridad o intensidad subjetiva se define como la propiedad de los sonidos que produce en el oyente una sensación que permite ordenar de forma subjetiva su valor sobre una escala de débiles a fuertes, y en consecuencia no puede ser medida directamente. La sonoridad depende fundamentalmente del nivel de presión sonora del estímulo sonoro, y en menor medida de su frecuencia, duración y complejidad espectral. Desgraciadamente los mecanismos subyacentes de la percepción de la sonoridad no están completamente comprendidos.

La unidad de sonoridad es el *sonio*, que se define como la sonoridad de un tono de 1000 Hz y un nivel de presión sonora de 40 dB. La escala de sonoridad es subjetiva y ha sido establecida de forma que un sonido de 3 sonios es tres veces más sonoro que un sonido de un sonio, uno de 5 sonios es cinco veces más sonoro que el de uno, etc. Experimentalmente se comprueba que para un oyente medio, un aumento de 10 dB en el nivel de presión sonora duplica la sonoridad.

La sonoridad de un sonido puede estimarse de varias formas, una mediante enjuiciamientos subjetivos de un grupo de oyentes con audición normal, otro mediante cálculo del análisis espectral del ruido,(existen varias normas ISO), y también mediante una medida instrumental que intenta representar la respuesta del oído.

El oído humano no percibe con la misma sonoridad dos ondas sonoras de distinta frecuencia y el mismo nivel de presión sonora. A partir de 1.930 se efectuaron estudios experimentales sobre un gran número de personas jóvenes con audición normal, entre 18 y 25 años, para relacionar los tonos puros de varias frecuencias y niveles de igual sonoridad. Se les hacia escuchar tonos puros de distintas frecuencias variando su nivel de presión sonora, como referencia se utilizaba un tono puro de 1 kHz. el resultado experimental fue la obtención de las *curvas de igual nivel de sonoridad o lineas isofónicas* para tonos puros. La unidad del nivel de sonoridad es el *fonio.* La primera familia de líneas isofónicas fue obtenida por Fletcher y Munson en 1933.

El nivel de sonoridad de un sonido es de N fonios, si a juicio de un oyente con audición normal, la sensación auditiva binaural producida por un sonido o ruido, es equivalente a la de un tono puro de 1 kHz, propagándose en forma de ondas planas progresivas, procedentes desde enfrente del oyente, cuyo nivel de presión sonora es de N dB, referencia 2.10^{-5} Pa. El fonio es una unidad subjetivamente constante.

Existen diferentes curvas de niveles de sonoridad que presentan ligeras diferencias entre ellas. Parece que los contornos de igual sonoridad pueden estar influenciados por efectos de sesgo. La forma de las curvas no se debe considerar muy exacta. Hay investigadores, que en el caso particular de algunas de las curvas no han detectado un descenso alrededor de 500 Hz.

Todos los puntos de una curva determinada representan los niveles de presión sonora que han sido considerados como igualmente sonoros en campo libre, pero esto no implica que produzcan la misma molestia o interfieran igual la comunicación hablada. Por ejemplo un tono puro de 50 Hz y nivel de presión sonora 60 dB se oye tan sonoro como un tono puro de 1 kHz y un nivel de presión sonora de 30 dB.

En las curvas de igual sonoridad para tonos puros se observa que el oído responde mal a bajas y altas frecuencias. Las curvas convergen en la región de bajas frecuencias, siguen aproximadamente paralelas entre 1 kHz y 10 kHz. Las curvas nos muestran que la respuesta en frecuencia del oído depende también del nivel de presión sonora. El oído es más sensible a frecuencias entre 1.000 y 5.000 Hz, donde se concentra la máxima información del lenguaje hablado. Cuando los niveles sonoros se incrementan la sensibilidad llega a ser más uniforme con la frecuencia, las curvas son más planas. Los sonidos de frecuencias superiores a los 2000 Hz son generalmente más molestos que los de medias y bajas frecuencias al ser el oído menos sensible en esa zona del espectro.

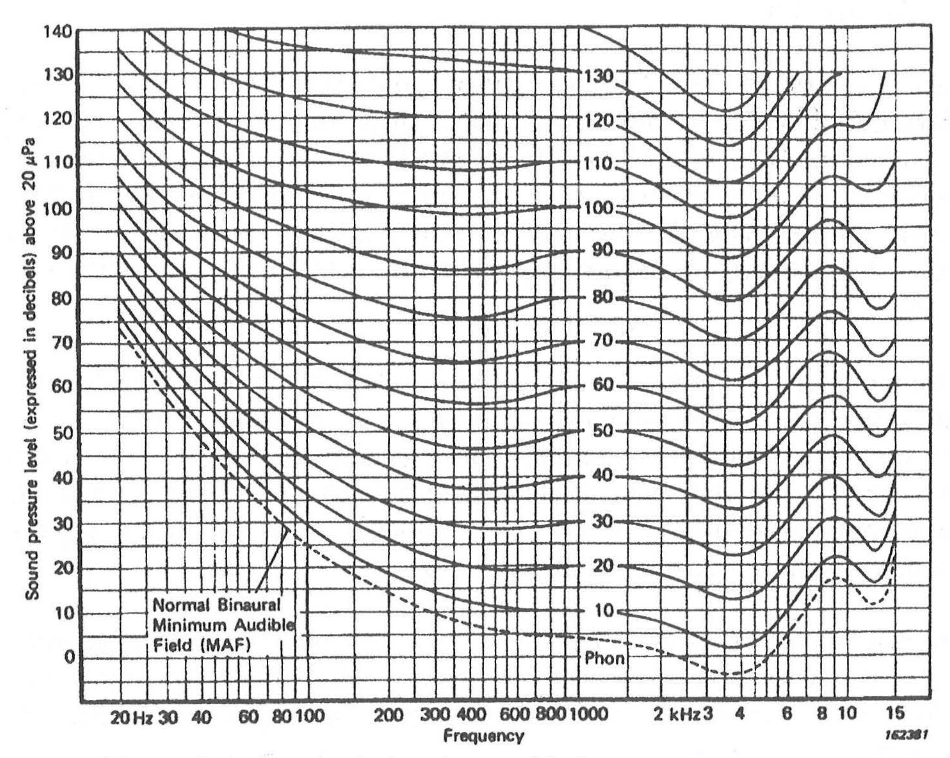


Figura 3.6: Curvas de igual sonoridad para tonos puros

La transformación de sonios a fonios, sigue la expresión de Robinson :

$$S = 2^{0,1F-4} \quad \text{sonio} \;, F > 40 \;\text{ fonios} \qquad [3.3]$$

Los fonios y los sonios son independientes de la frecuencia, en la práctica de la Acústica Arquitectónica y Ambiental su utilización es muy limitada y en general se utiliza el dB ponderado A.

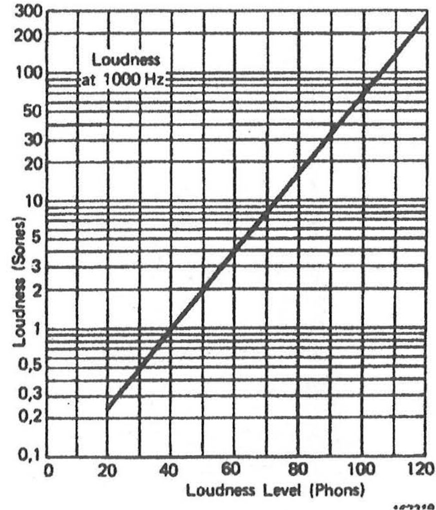


Figura 3.7: Relación entre la sonoridad y el nivel de sonoridad.

3.5.- ENMASCARAMIENTO

En muchas situaciones nuestra habilidad para detectar sonidos débiles no está limitado por la sensibilidad del oído a estos sonidos sino por el ruido ambiental. Una propiedad importante del sonido es su capacidad de enmascarar la audición de otro sonido. El enmascaramiento es el proceso mediante el cual el umbral de audibilidad de un sonido, la señal, se eleva en presencia de otro sonido enmascarador. Se llama grado de enmascaramiento a la cantidad, en dB, que sobre el nivel umbral tiene que elevarse la señal para ser audible.

El enmascaramiento es un fenómeno muy complejo, que depende de los parámetros físicos del sonido, nivel de presión sonora, composición en frecuencia, dirección de llegada, instante en que el sonido es percibido por el aparato auditivo, etc. En parte puede explicarse por el comportamiento del oído ante señales que excitan las mismas regiones de la membrana basilar. Cuando dos sonidos excitan la misma región, únicamente el sonido más fuerte se oirá, ya que este bloqueará los nervios auditivos.

Se han realizado muchas investigaciones estudiando el enmascaramiento en función de que el ruido sea de banda ancha o estrecha, tonos puros, ruidos estacionarios, intermitentes, impulsivos, combinaciones de ellos, etc. Las siguientes reglas son generalmente aceptadas:
1) Un ruido de banda estrecha produce más enmascaramiento que un tono puro de igual nivel de presión sonora centrado en la misma frecuencia.
2) A bajos niveles sonoros, el efecto de enmascaramiento está reducido a una estrecha banda alrededor del centro de frecuencia del sonido enmascarante.
3) Si la sonoridad del sonido enmascarante aumenta, el rango de frecuencias afectadas también se incrementa.
4) El efecto de enmascaramiento no es simétrico, las frecuencias a la derecha del ruido enmascarante están más afectadas que las que están a su izquierda.

En la figura inferior puede verse el efecto del enmascaramiento de una banda estrecha de ruido, de ancho inferior a la banda crítica con frecuencia central de 1,2 kHz (según Zwicker).

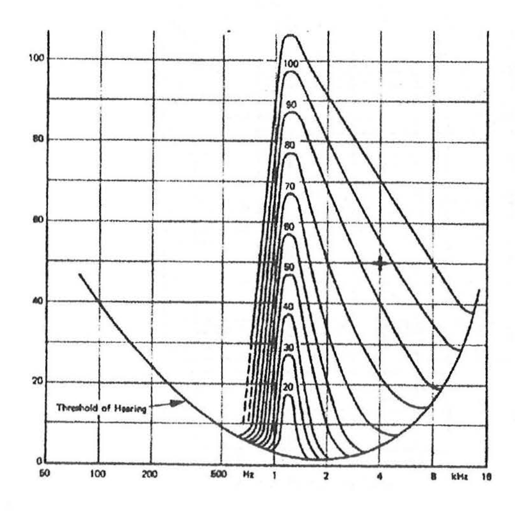


Figura 3.8: Efectos del enmascaramiento en una banda de ruido estrecha.

El parámetro es el nivel de presión sonora del ruido, en el eje de ordenadas se hallan los niveles del sonido enmascarado. Las zonas comprendidas entre las curvas y el eje de abcisas corresponden a regiones totalmente enmascaradas. Por ejemplo, en la figura puede observarse que un tono de 4 kHz a 50 dB puede ser oído si el nivel del ruido enmascarante es de 90 dB, pero está enmascarado si el nivel del ruido es de 100 dB.

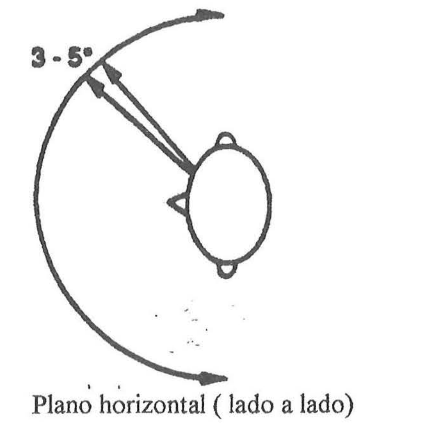
El enmascaramiento es a menudo un problema importante en la seguridad, pues puede enmascarar el sonido de un vehículo que se acerca, una señal de alarma en un centro de trabajo. Otras veces es una ventaja, por ejemplo en las viviendas, el ruido de tráfico puede enmascarar el ruido de las instalaciones, vecinos, etc.

3.6.- LOCALIZACIÓN AUDITIVA.

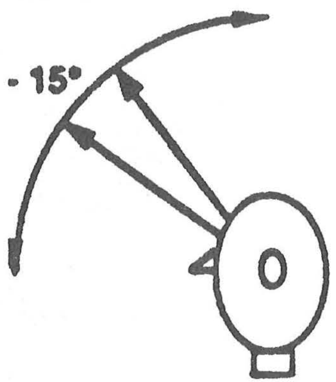
El sonido antes de penetrar en los oídos, se encuentra en primer lugar con la cabeza humana, esta interfiere el campo sonoro del lugar en donde está situada. En altas frecuencias es un obstáculo efectivo a las ondas sonoras y se produce una diferencia de presión sonora en los oídos. A frecuencias medias las ondas se difractan alrededor de la cabeza, produciéndose cambios de fase e intensidad; a bajas frecuencias la cabeza causa un pequeño retraso de tiempo en los oídos, pero no modifica la intensidad. Al tener dos oídos, los efectos de difracción y sombra de la cabeza, son parcialmente responsables de funciones auditivas tan importantes como la localización auditiva, ángulo mínimo audible y percepción del espacio.

La localización auditiva es la capacidad del sistema auditivo de localizar la dirección de una fuente sonora, debido a la recepción binaural que permite detectar pequeñas variaciones de dirección.

La localización auditiva en el plano horizontal es muy superior a la del plano vertical. Si una fuente sonora se encuentra en el plano medio de la cabeza, de frente al oyente, el sonido alcanza ambos oídos al mismo tiempo y con la misma presión sonora. Un cambio de dirección de un ángulo de 3° en el plano horizontal es perceptible, en este caso la diferencia de tiempo de llegada del sonido a los dos oídos es de 3.10^{-5} s. Cuando la fuente sonora se ha desplazado a un lado de la cabeza, 90° respecto al plano medio de la cabeza, la diferencia de tiempo de llegada es máximo, $6{,}3.10^{-5}$ s, que corresponde a una diferencia de camino de 21 cm, constante de Von Hornbostel-Wertheimer.



Plano horizontal (lado a lado)

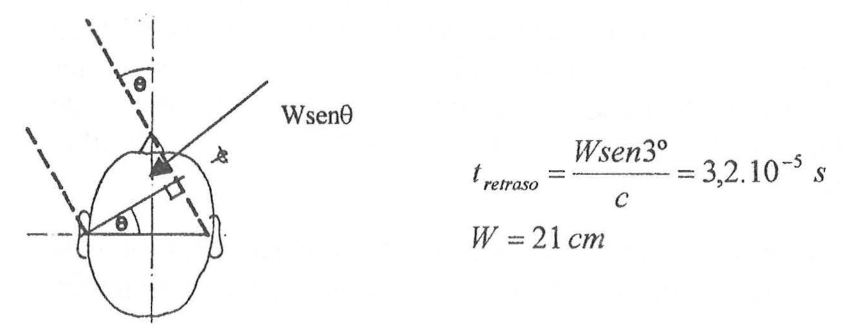


Plano vertical (arriba y abajo)

Figura 3.9: Localización auditiva del oído humano.

Cuando el sonido llega desde un plano vertical, las señales en los oídos son casi idénticas. Se necesitan cambios de ángulos relativamente amplios para producir cambios significantes en el espectro de amplitud en los dos oídos, en consecuencia la agudeza en la localización es menor, debido a esto se pueden distribuir más los altavoces en el plano vertical, sin que el oyente pueda localizarlos

Además de la diferencia de tiempos, la diferencia de presión sonora entre los dos oídos contribuye a la sensación direccional a altas frecuencias. Una fuente sonora puede localizarse bastante bien en un recinto cerrado, en donde el sonido llega al oyente después de múltiples reflexiones en las superficies del mismo. El oyente localiza auditivamente el primer sonido que llega a su oído, sin tener en cuenta las reflexiones posteriores, siempre que lleguen en un intervalo de tiempo menor de 35 ms, que sean semejantes al primer sonido y que no sean más sonoros que él. Este tema del campo de la audición binaural ha sido estudiado bajo varios nombres (Efecto Haas o efecto de precedencia binaural, también ley del primer frente de onda). Todo lo anterior es de gran importancia en la acústica de recintos y en el diseño de sistemas de refuerzo sonoro.



$$t_{retraso} = \frac{Wsen3^{o}}{c} = 3{,}2.10^{-5}\ s$$

$$W = 21\,cm$$

La diferencia de nivel de intensidad entre el oído derecho e izquierdo está indicada por la *diferencia de nivel interaural*, *(Interaural Level Difference)*, ILD. Este parámetro tiene una gran dependencia con la frecuencia. La figura 3.10 muestra los resultados de la diferencia de nivel interaural para diferentes ángulos de incidencia respecto al plano que forman la oreja y la nariz. (Hartmann, 1999)

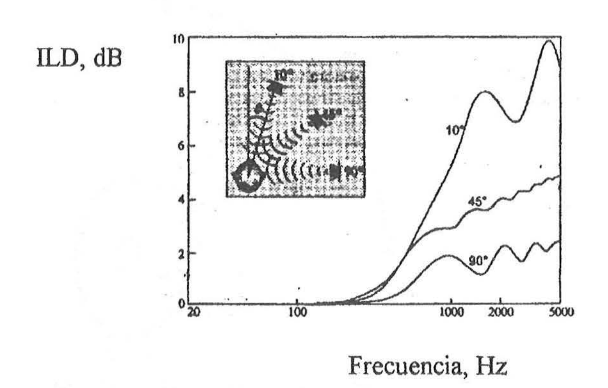


Figura 3.10: Diferencia de nivel interaural.

3.7.-EFECTOS DEL RUIDO EN LOS SERES HUMANOS

El ruido afecta a los seres humanos físicamente, sicológicamente y socialmente. La exposición durante largos intervalos de tiempo a niveles sonoros elevados puede causar efectos nocivos sobre la salud humana tales como: molestias provocadas por el ruido, alteración del sueño, interferencia con la comunicación oral, efectos negativos sobre el aprendizaje, pérdida de la audición, bajo rendimiento en el trabajo, estrés o hipertensión, etc.

Desde muy antiguo han existido prohibiciones en materia de ruido, pues además de ser un factor de distorsión ecológico, influye en el bienestar y la convivencia pacífica de los ciudadanos.

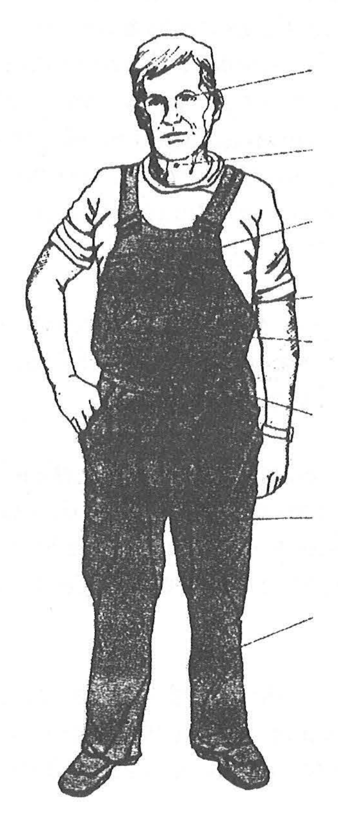


Figura 3.11: Efecto del ruido en los órganos del cuerpo humano.

En la figura 3.11 se muestran algunos de los efectos sobre los órganos del cuerpo humano, al estar sometido a elevados niveles de ruido durante intervalos de tiempo largos.

4.- FUENTES SONORAS

4.1.- INTRODUCCIÓN

Una fuente sonora es cualquier dispositivo capaz de producir una perturbación sonora en el ambiente. Las fuentes sonoras son de muy diversos tipos, tanto en su forma geométrica como en los mecanismos de generación, potencia sonora radiada, rendimiento mecánico-acústico, espectro de radiación en frecuencias, directividad en campo libre, etc. Los más comunes son la voz humana, los instrumentos musicales, altavoces, diferentes tipos de maquinaría, etc.

Los factores más importantes que caracterizan a una fuente sonora son: su diagrama de directividad y el rendimiento de radiación, ambos dependen de la frecuencia. *Es muy importante poder determinar la relación que existe entre la potencia acústica con la que emite una fuente sonora y el nivel de presión sonora en el punto de recepción.* Cuando una fuente sonora emite en un campo libre, (en un campo acústico en el que no hay superficies límites reflectantes), es importante conocer su nivel de potencia sonora y su directividad. En un recinto cerrado la directividad es menos importante, al estar muy afectada por las reflexiones en las superficies interiores.

El campo acústico es función de la distancia entre la fuente y el punto de recepción. Sus expresiones analíticas varían según la proximidad a la fuente y sus dimensiones. El campo sonoro radiado por una fuente en un campo libre se puede dividir en tres regiones:

Campo próximo hidrodinámico. Es la región inmediatamente adyacente a la superficie de la fuente que vibra, extendiéndose hasta una distancia un tercio de la longitud de onda. Esta región está caracterizada por el movimiento del fluido y no está asociada a la propagación sonora. La potencia sonora de la fuente y la presión sonora en los puntos de esta región no están relacionadas matemáticamente.

Campo próximo geométrico, o de Fresnel. La potencia sonora de la fuente y la presión sonora en los puntos de esta región tampoco están relacionadas. Cada elemento de la fuente sonora interacciona, y para pequeños desplazamientos en la proximidad de la fuente el campo acústico presenta grandes variaciones.

Campo lejano, o de Fraunhofer. En esta región pueden establecerse expresiones analíticas aproximadas entre las magnitudes físicas del campo acústico. El nivel de presión sonora decrece 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente sonora. La condición de campo lejano se cumple si la distancia a la fuente cumple las tres condiciones siguientes, (Bies, Hansen, 1988):

$$r \gg \frac{\lambda}{2\pi}, \quad r \gg l, \quad r \gg \frac{\pi d^2}{2\lambda}$$

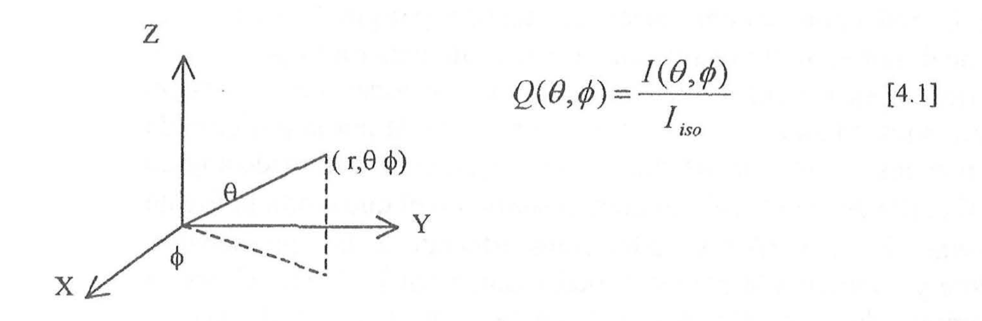
donde l, es la mayor dimensión lineal de la fuente y λ, la longitud de onda mayor. Mucho mayor quiere decir al menos tres veces mayor.

Entre las regiones anteriores existen zonas de transición, por ejemplo a la zona de transición entre las regiones de Fresnel y Fraunhofer se la denomina *campo intermedio o de Rayleigh.*

4.2.- DIRECTIVIDAD DE LAS FUENTES SONORAS

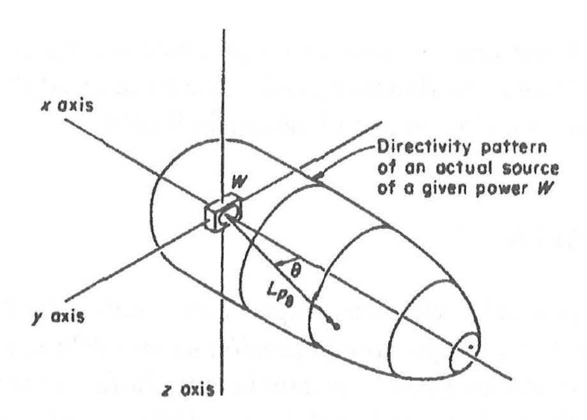
La mayoría de las fuentes sonoras de interés práctico son direccionales. Si medimos el nivel de presión sonora en una determinada banda de frecuencia a una distancia fija de la fuente en diferentes posiciones alrededor de ella, encontraremos que los niveles de presión sonora variarán en general. La representación de estos niveles en forma polar, según el ángulo en que son obtenidos, nos da el patrón de directividad de la fuente. *Las mediciones se realizan en campo libre.*

El *factor de directividad* Q(θ,ϕ) de una fuente sonora en una determinada dirección, se define, como la relación entre la intensidad acústica que llega a un punto producida por la fuente sonora y la intensidad acústica, que llegaría al mismo punto, producida por una fuente sonora ideal isotrópica que emitiese con igual potencia.



$$Q(\theta,\phi)=\frac{I(\theta,\phi)}{I_{iso}} \qquad [4.1]$$

En muchos casos, las fuentes sonoras tienen simetría de revolución. Si se elige un eje de simetría, por ejemplo el eje OZ, se pueden simplificar los cálculos, ya que la intensidad de radiación de la fuente será únicamente función del ángulo θ.



Alternativamente, se puede definir el factor de directividad Q_θ a una distancia r y un ángulo θ de la fuente, como la relación de la presión sonora eficaz al cuadrado de la fuente sonora emitiendo a una potencia W y el cuadrado de la presión sonora eficaz a la misma distancia de una fuente no direccional (isotrópica) emitiendo con la misma potencia.

$$Q_\theta = \frac{p_\theta^2}{p_{iso}^2} = \frac{I_\theta}{I_{iso}} = \frac{10^{0,1Lp_\theta}}{10^{0,1Lp_{iso}}} = 10^{0,1(Lp_\theta - Lp_{iso})} \qquad [4.2]$$

El *índice de directividad o ganancia direccional*, DI_θ, (G_θ) se define como

$$DI_\theta = 10.\log Q_\theta \qquad dB, ref\, 2.10^{-5}\, Pa \qquad [4.3]$$

$$DI_\theta = Lp_\theta - Lp_{iso} \qquad dB, ref\, 2.10^{-5}\, Pa \qquad [4.4]$$

Los valores positivos del índice de directividad corresponden a direcciones con intensidades acústicas superiores a la isotrópica, y los negativos a direcciones poco favorables. El factor de directividad y el índice de directividad de una fuente, en general, son función de la frecuencia del sonido emitido.

La direccionalidad de la radiación sonora puede producirse porque la fuente sea intrínsecamente direccional, por ejemplo una máquina que emite más ruido por la parte frontal que por la posterior, o puede ocurrir que fuentes omnidireccionales en el espacio libre llegan a ser direccionales. Si su emisión sonora está restringida por la posición de la fuente respecto a las paredes, techos, suelos, etc, emiten según un determinado ángulo sólido Ω. Por ejemplo si emite desde el suelo el ángulo sólido en el que emite la fuente es de 2π sr. En general las superficies reflectantes afectan a las propiedades direccionales de la fuente y también a la potencia total radiada por la fuente. Como el problema suele ser complicado, generalmente se hace la simplificación de que la potencia de salida de la fuente es constante.

Es útil el conocer el nivel de potencia sonora y la directividad de las fuentes para determinar el nivel de presión sonora a una distancia determinada de la misma, comparar el ruido emitido por máquinas del mismo o diferente tamaño, desarrollo de máquinas menos ruidosas, etc.

Existen diversos procedimientos para determinar los niveles de potencia sonora de una fuente tanto en campo libre, como en cámara reverberante, basándose en las medidas de la presión sonora, o en la intensidad sonora en las proximidades de la fuente.

4.3.- FUENTES ESFÉRICAS PUNTUALES

La fuente sonora más elemental es la puntual o esférica simple, (con radio menor que λ/6), que radia de forma omnidireccional. En campo libre,la presión sonora debida a una fuente esférica puntual de potencia W disminuye con la distancia entre la fuente sonora y el receptor,debido a la divergencia esférica de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p_{iso}^2}{\rho c} \quad \frac{W}{m^2} \qquad [4.5]$$

$$Q_\theta = \frac{p_\theta^2}{p_{iso}^2} \qquad [4.6]$$

$$p_\theta^2 = Q_\theta I\rho c = \frac{WQ_\theta \rho c}{4\pi r^2} \quad Pa^2 \qquad [4.7]$$

Al tener en cuenta las definiciones de niveles de presión sonora, de potencia sonora y no considerar el término $10\lg\frac{\rho c W_{ref}}{p_{ref}^2} \approx 0{,}2\ dB$, se obtiene

$$L_p(r,\theta) = L_w + 10\lg\frac{Q_\theta}{4\pi r^2} \quad dB \qquad [4.8]$$

$$L_p(r,\theta) = L_w + DI_\theta - 20\lg\frac{r}{1m} - 11 \quad dB \qquad [4.9]$$

Se llama atenuación por divergencia $A_{div} = -20\lg\frac{r}{1m} - 11\, dB$ [4.10]

$$L_p(r,\theta) = L_w + DI_\theta - A_{div} \quad dB \qquad [4.11]$$

Este tipo de emisión puede considerarse que se produce en una cámara anecoica o en emisiones al aire libre lejos del suelo. Se comprueba fácilmente que al doblar la distancia entre el emisor y el receptor, el nivel de presión sonora disminuye en 6 dB a todas las frecuencias. En la práctica hay que tener en consideración otros factores como veremos en los apartados siguientes, y la disminución anterior no se cumple.

Si se conoce el nivel de presión sonora L_{p1}a una distancia r_1 de la fuente en una determinada dirección, es posible determinar el nivel de presión sonora en esa misma dirección a una distancia r_2, sin que sea necesario el conocimiento del nivel de potencia de la fuente. Se obtiene:

$$L_{p2} = L_{p1} - 20\lg\frac{r_2}{r_1} \quad dB \qquad [4.12]$$

Si las direcciones de los puntos r_1 y r_2 son diferentes respecto a la fuente, hay que tener en consideración el índice de directividad de la fuente en cada dirección. Se obtiene

$$L_{p\theta 2} = L_{p\theta 1} - 20\lg\frac{r_2}{r_1} + DI_{\theta 2} - DI_{\theta 1} \quad dB \qquad [4.13]$$

En la realidad las fuentes sonoras no son puntuales, aunque podamos aproximarlas a este modelo ideal. En la práctica se puede encontrar que a partir de una determinada distancia de la fuente, el nivel de presión sonora decrece 6 dB al doblar la distancia a la fuente. A esta zona donde se cumplen las leyes de la divergencia esférica se le llama *campo lejano,* en ella el comportamiento de la fuente es independiente de su forma y dimensiones. La zona próxima a la fuente se llama *campo próximo* y está influenciada por las dimensiones de la fuente sonora.

En la Tabla 4.1 se muestran el factor de directividad y el índice de directividad en el caso de una fuente sonora puntual cerca de superficies reflectantes, considerando que la potencia de la fuente permanece constante.

Factores de directividad para una fuente puntual cerca de superficies reflectantes. La potencia de la fuente permanece constante		
Situación	Factor de Directividad, Q_θ	Índice de directividad, DI_θ, dB
Radiación en una esfera	1	0
Radiación en una semiesfera	2	3
Radiación en un cuarto de esfera	4	6
Radiación en un octavo de esfera	8	9

Tabla 4.1: Factores e índices de directividad de una fuente puntual.

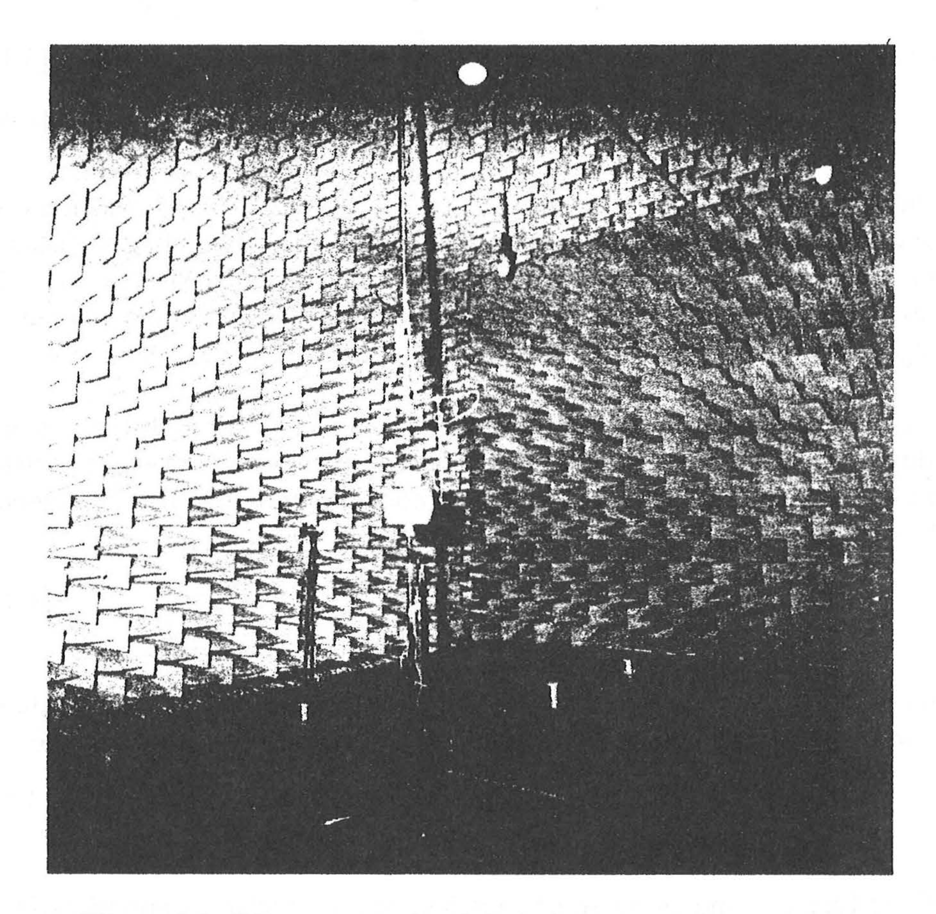


Figura 4.1: Cámara anecoica del Instituto de Acústica, CSIC.
Dimensiones interiores 7,4 x 5,5 x 5,5 m^3

4.4.- FUENTES PUNTUALES EN LÍNEA RECTA

Se dispone un número muy grande de fuentes puntuales omnidireccionales iguales, incoherentes, colocadas en línea recta, con una separación de b metros entre ellas y que emiten con la misma potencia W_0,. Se puede demostrar que el valor de la intensidad sonora media se puede aproximar mediante las siguientes relaciones, según los valores de la distancia del punto de observación a la recta. (E.J.Rathe, 1969 "Note on Two Common Problems of Sound Propagation", J. Sound Vib. 10(3), 472-476).

$$r \langle \frac{b}{\pi} \quad I = \frac{p^2}{\rho c} = \frac{W_0}{4\pi r^2} \qquad [4.14]$$

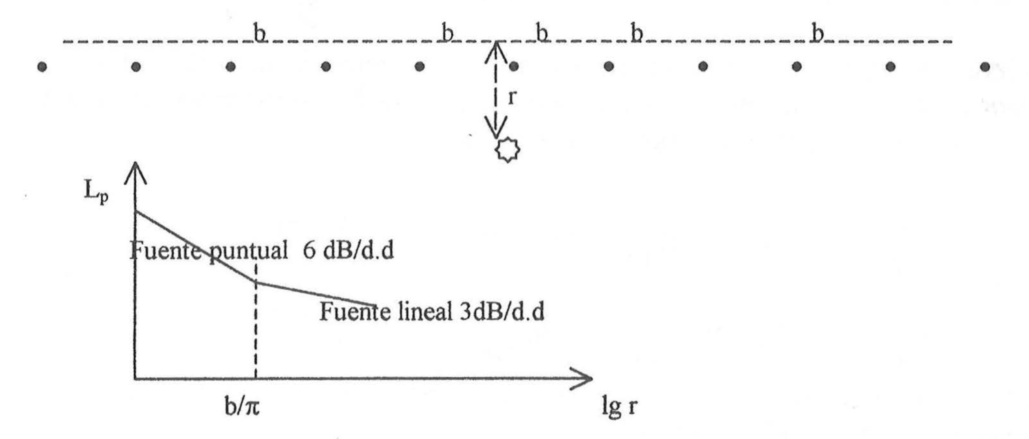
$$r \geq \frac{b}{\pi} \quad I = \frac{p^2}{\rho c} = \frac{W_0}{4br} \qquad [4.15]$$

El nivel de presión sonora a una distancia de r metros de la línea se obtiene por aplicación de las siguientes expresiones:

$$r \langle \frac{b}{\pi} \quad L_p = L_w - 20\lg\frac{r}{1\,m} - 11 \quad dB \qquad [4.16]$$

$$r \rangle \frac{b}{\pi} \quad L_p = L_w - 10\lg\frac{r}{1\,m} - 10\lg\frac{4b}{1\,m} \quad dB \qquad [4.17]$$

Para distancias próximas a la alineación de fuentes el nivel de presión sonora disminuye 6 dB al doblar la distancia. Lejos de las fuentes decrece únicamente 3 dB al doblar la distancia.



Los ruidos de tráfico de carreteras y tuberías largas radiando energía sonora en banda ancha se suelen modelar como fuentes lineales incoherentes.

Si se considera que las fuentes alineadas son coherentes, su estudio es bastante complicado, y el problema se simplifica si se considera que todas las fuentes radian en fase.

Cuando el punto de observación r cumple la condición r/λ>>1, experimentalmente se comprueba que la línea de fuentes coherentes emite como una fuente continua de ondas cilíndricas. En consecuencia, si las fuentes son coherentes y todas radian en fase se admite la hipótesis de que la radiación se produce en forma de ondas cilíndricas de área por unidad de longitud 2πr. A una distancia r de la línea se cumple

$$I = \frac{W}{2\pi rb} = \frac{p^2}{\rho c} \qquad [4.18]$$

$$p^2 = \frac{W\rho c}{2\pi rb} \qquad [4.19]$$

se obtiene la siguiente relación

$$L_p = L_w - 10\lg\frac{r}{1m} - 10\lg\frac{b}{1m} - 8 \quad dB \qquad [4.20]$$

El nivel de presión sonora decrece 3 dB al doblar la distancia del punto de observación a la línea de fuentes coherentes de igual fase.

Si la distancia entre las fuentes se puede hacer muy pequeña, se considera un sistema continuo, y que W/b es constante, se pueden escribir para fuentes lineales infinitas a distancias no próximas a la línea y si se considera el índice de directividad correspondiente DI_θ, las siguientes expresiones:

Fuentes incoherentes: $$L_p = L_w + DI_\theta - 10.\lg\frac{r}{1m} - 6 \quad dB \qquad [4.21]$$

Fuentes coherentes: $$L_p = L_w + DI_\theta - 10.\lg\frac{r}{1m} - 8 \quad dB \qquad [4.22]$$

donde L_w es el nivel de potencia por unidad de longitud de la fuente.

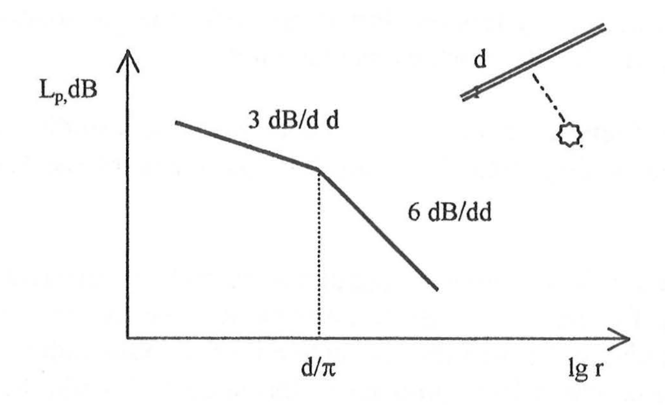
4.5.- FUENTE SONORA SEGMENTO RECTILÍNEO

Si se considera un segmento rectilíneo de longitud d y potencia acústica total W, constituido por fuentes sonoras puntuales incoherentes, el nivel de presión sonora a una distancia r del segmento rectilíneo es aproximadamente:

$$r\rangle\frac{d}{\pi} \quad L_p = L_w - 20\lg\frac{r}{1m} - 11 \quad dB \qquad [4.23]$$

$$r\langle\frac{d}{\pi} \quad L_p = L_w - 10\lg\frac{r}{1m} - 10\lg\frac{4d}{1m} \quad dB \qquad [4.24]$$

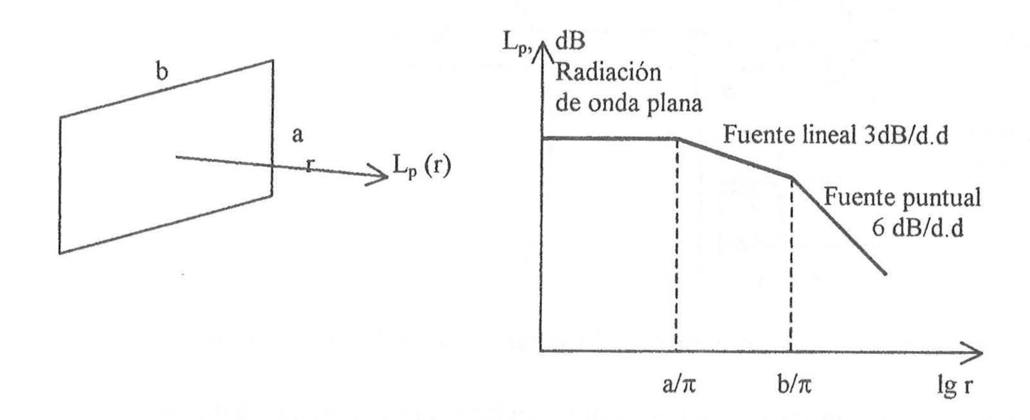
Cerca de la fuente el nivel de presión sonora decrece 3 dB al doblar la distancia. Lejos de la fuente decrece como una fuente puntual.



4.6.- RADIACIÓN DEL SONIDO POR UNA SUPERFICIE PLANA

Un método aproximado para predecir niveles de presión sonora a una distancia r de una superficie plana rectangular de dimensiones a, b, donde b > a, asume:

1) radiación de ondas planas para distancias menores a/π
2) fuente lineal de radiación para distancias entre a/π y b/π
3) fuente puntual para distancias mayores que b/ π



$$r < \frac{b}{\pi} \quad L_p = L_w + 10\lg\frac{\pi . 1m^2}{4ab} \quad dB \qquad [4.25]$$

$$\frac{b}{\pi} < r < \frac{a}{\pi} \quad L_p = L_w - 10\lg\frac{r}{1m} - 10\lg\frac{4b}{1m} \quad dB \qquad [4.26]$$

$$r > \frac{b}{\pi} \quad L_p = L_w - 20\lg\frac{r}{1m} - 11 \quad dB \qquad [4.27]$$

4.7.- LA VOZ HUMANA

El lenguaje oral es un medio de comunicación humano muy importante, que consiste en la facultad de comunicarse mediante signos lingüísticos. Las palabras son signos lingüísticos que pueden descomponerse en unidades mínimas con significación llamadas monemas. Los monemas pueden descomponerse en unidades mínimas sin significación llamadas fonemas.

En el habla humana, las cuerdas vocales producen las vibraciones del aire; la garganta y las cavidades bucal y nasal actúan como estructuras resonantes. La gran variedad de sonidos emitidos por los seres humanos se debe básicamente a que *la tensión de las cuerdas vocales se pueden variar*, en consecuencia las frecuencias producidas y la proporción de armónicos se puede variar, y a *las estructuras resonantes*, en particular la cavidad bucal, que pueden cambiar de forma y de dimensiones para modificar las frecuencias de los sonidos amplificados. Las frecuencias importantes en el habla están comprendidas entre 300 Hz y 3000 Hz.

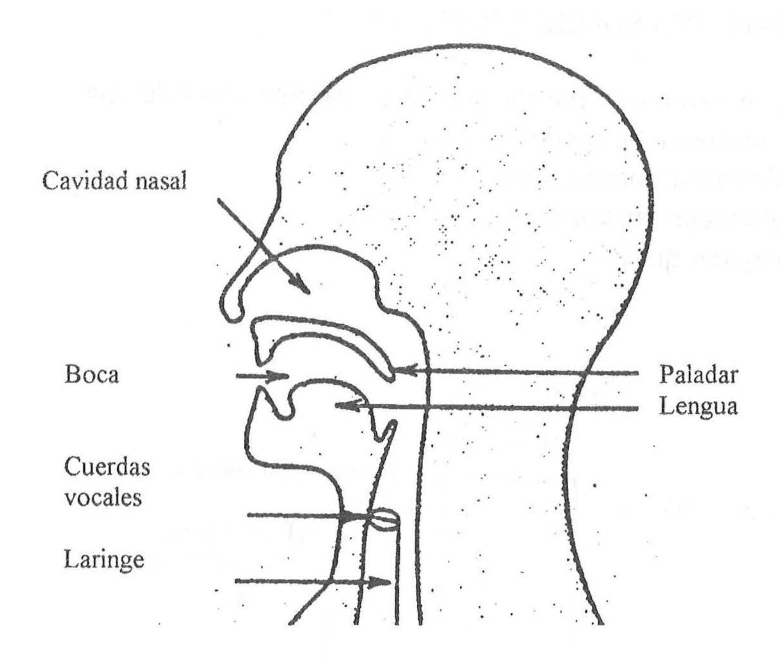


Figura 4.2: Componentes fundamentales del mecanismo del habla humana.

Una persona al hablar emite sonidos cuyas frecuencias cubren gran parte del dominio de las frecuencias audibles, de 50 a 10 kHz. Casi toda la información en el lenguaje está comprendida entre 200 Hz y 7 kHz.

La habilidad de nuestro órgano de la audición para reconocer los sonidos de la palabra hablada es muy grande. La palabra hablada puede ser seguida a velocidades de hasta 400 palabras por minuto. Si consideramos un promedio de cinco fonemas o sonidos individuales por palabra, esto significa un reconocimiento de 30 fonemas por segundo. Una conversación normal requiere el reconocimiento de entre 10 y 15 fonemas por segundo.

ESPECTRO DE LOS NIVELES SONOROS DE LA VOZ HUMANA SEGÚN EL ESFUERZO VOCAL

Según un amplio trabajo realizado por Pearsons, Bennet y Fidell en 1.977, la media de los niveles sonoros ponderados A para distintos esfuerzos vocales, a 1 m de distancia de la boca del orador, en campo libre y en ambientes silenciosos son los siguientes:

Esfuerzo vocal	Relajado	Normal	Elevado	Alto	A gritos
Hombres, L_{pA}, dB	53	58	65	75	88
Mujeres, L_{pA}, dB	50	55	62	71	82

En las figuras 4.3 a 4.6 se muestran la media de los promedios del espectro del habla a largo plazo medido para diferentes esfuerzos vocales para oradores adultos masculinos y femeninos en idioma ingles, en campo libre a una distancia de 1 m de los labios de los oradores.

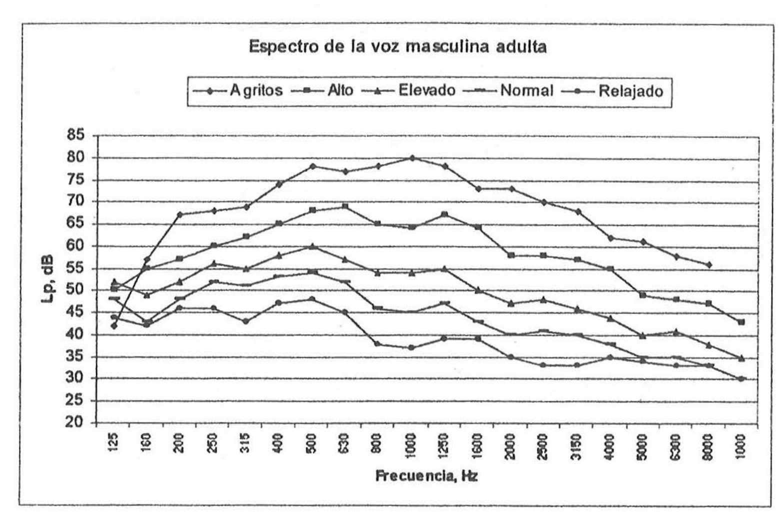


Figura 4.3: Espectro de la voz masculina según el esfuerzo vocal.

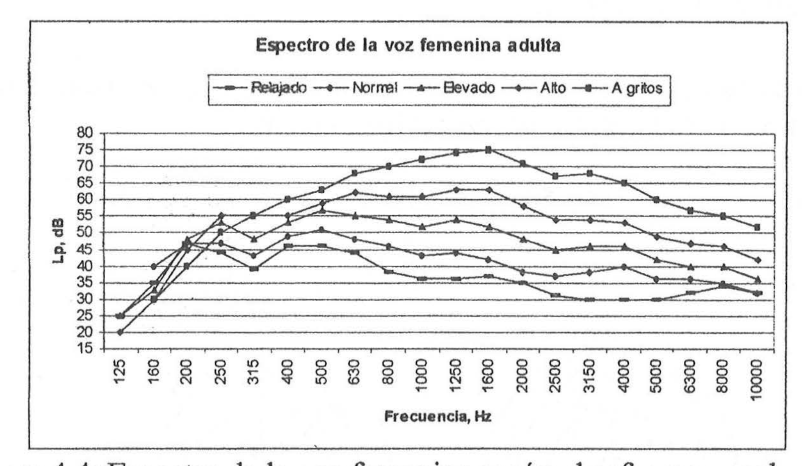


Figura 4.4: Espectro de la voz femenina según el esfuerzo vocal.

Tanto en hombres como en mujeres, para esfuerzos vocales relajado, normal y elevado, la banda de 500 Hz en 1/3 de octava muestra el mayor nivel de presión sonora. En el esfuerzo vocal a gritos, el máximo nivel de presión sonora es a 1250 Hz para los hombres y entre 1250 y 1600 Hz para las mujeres. En promedio se comprueba, que la voz masculina es más potente que la femenina para el mismo esfuerzo vocal.

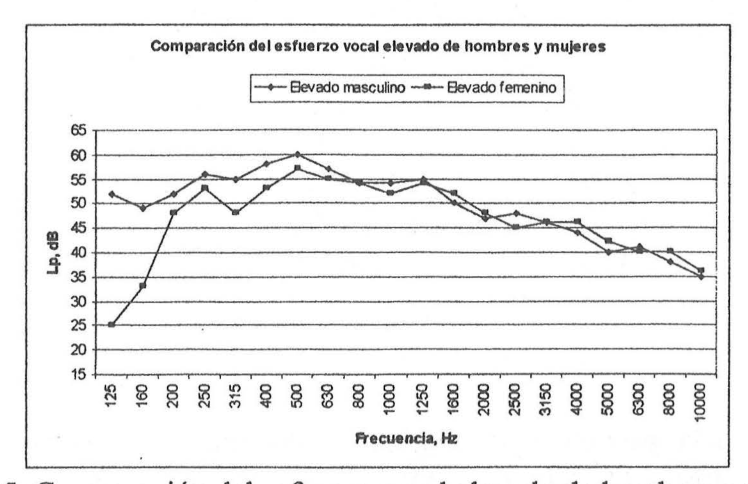


Figura 4.5: Comparación del esfuerzo vocal elevado de hombres y mujeres.

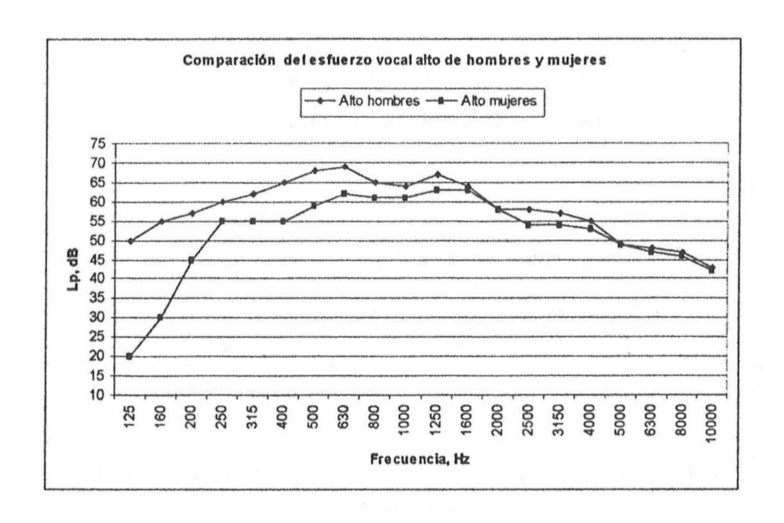


Figura 4.6: Comparación del esfuerzo vocal elevado de hombres y mujeres

DIRECTIVIDAD DE LA VOZ HUMANA

Los factores e índices de directividad de la voz humana que se suelen utilizar en programas de simulación son aproximadamente los siguientes.

Frec, Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Q_θ	1,3	1,4	1,7	1,74	1,8	3	3,8
DI_θ, dB	1,1	1,4	2,3	2,4	2,5	4,7	5,8

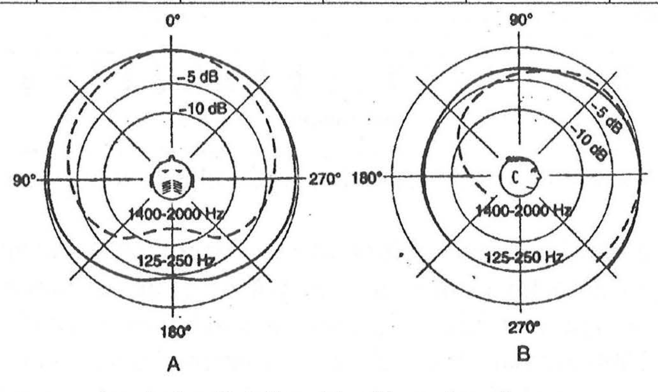


Figura 4.7: Diagrama polar de la distribución direccional para un orador en un plano horizontal A y otro vertical B.(H. Kutruff).

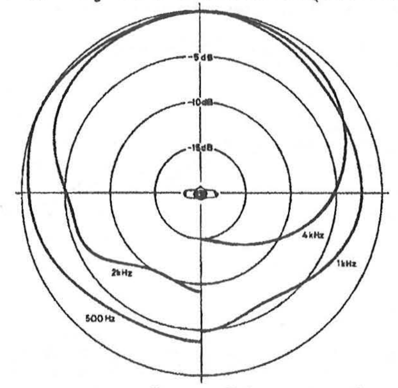


Figura 4.7: Diagrama polar para un orador a diferentes frecuencias, en bandas de 1:3 de octava. (A. Moreno, J, Pfretzschner, 1977).

5.- PROPAGACION DEL SONIDO AL AIRE LIBRE

5.1.- INTRODUCCION

La propagación del sonido al aire libre depende fundamentalmente de la naturaleza y distribución de las fuentes sonoras, de las condiciones atmosféricas, topografía del terreno y obstáculos interpuestos. Para la resolución práctica de problemas de control del ruido al aire libre, es necesario conocer gran número de datos meteorológicos de la zona a estudiar.

Cuando el sonido se propaga al aire libre, su nivel de presión acústica decrece al aumentar la distancia entre el emisor y el receptor. Esta atenuación es el resultado de varios mecanismos, principalmente por divergencia geométrica del sonido, absorción del sonido en el aire, reflexión y absorción en el suelo, reflexión y formación de sombras debido a gradientes de viento y temperatura, la niebla, reflexión y difracción en obstáculos sólidos (pantallas, vallas,..), dispersión del sonido por variaciones en pequeña escala del viento y la temperatura, vegetación, reflexiones en edificios, etc.

Las condiciones atmosféricas, principalmente el viento y la temperatura, tienen mayores efectos en la propagación del sonido a distancias superiores a 100 m.

En la práctica el problema consiste generalmente en calcular el nivel sonoro debido al ruido de la fuente a una distancia de ella, cuando hemos medido el nivel sonoro cerca de la misma.

5.2.- ABSORCIÓN DEL SONIDO POR UN FLUIDO

Cuando no existe degradación de la energía sonora en el medio donde se propagan las ondas, la intensidad de una onda plana permanece constante y la de una onda esférica disminuye con el inverso del cuadrado de la distancia a la fuente. En la práctica, la propagación del sonido se halla siempre acompañada de una disipación de energía acústica en forma de energía calorífica, debida a la viscosidad del fluido, conducción térmica y fenómenos de relajación molecular.

Se comprueba que, para ondas planas y esféricas, la disminución de intensidad acústica que acompaña a estos fenómenos es proporcional a la intensidad acústica en el punto considerado. Las expresiones de la intensidad a una distancia x, o r de la fuente son

Ondas planas:

$$I(x) = I(x_0)e^{-2\beta(X-X_0)} \quad [5.1]$$

Ondas esféricas:

$$I(x) = I(r_0)(\frac{r_0}{r})^2 e^{-2\beta(r-r_0)} \quad [5.2]$$

donde β, es la constante de atenuación del medio (nepers/m).

Para el caso particular del aire, se ha comprobado experimentalmente, que la atenuación del sonido durante su propagación, debido a la absorción del aire, viene dada por la expresión:

$$A_{aire} = \frac{\chi d}{1000} \quad \text{dB} \qquad [5.3]$$

χ es el coeficiente de atenuación atmosférica en dB/ km, d es la distancia en m entre los puntos de emisión y recepción. El coeficiente de atenuación atmosférica depende en gran parte de la frecuencia y la humedad relativa, y de forma menos importante de la temperatura.

La absorción del sonido en el aire puede no ser tenida en cuenta para distancias pequeñas a la fuente sonora, (menos de 100 m), excepto para frecuencias superiores a 5 kHz. A grandes distancias, donde la atenuación debida a la absorción del aire es importante a todas las frecuencias, el nivel sonoro deberá ser calculado en todas las bandas de frecuencia, a la temperatura y humedad relativa dada.

TEMPERATURA	HUMEDAD RELATIVA %	FRECUENCIA, Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
30 °C	10	0.96	1.8	3.4	8.7	29	96
	20	0.73	1.9	3.4	6.0	15	47
	30	0.54	1.7	3.7	6.2	12	33
	50	0.35	1.3	3.6	7.0	12	25
	70	0.26	0.96	3.1	7.4	13	23
	90	0.20	0.78	2.7	7.3	14	24
20 °C	10	0.78	1.6	4.3	14	45	109
	20	0.71	1.4	2.6	6.5	22	74
	30	0.62	1.4	2.5	5.0	14	49
	50	0.45	1.3	2.7	4.7	9.9	29
	70	0.34	1.1	2.8	5.0	9.0	23
	90	0.27	0.97	2.7	5.3	9.1	20
10 °C	10	0.79	2.3	7.5	22	42	57
	20	0.58	1.2	3.3	11	36	92
	30	0.55	1.1	2.3	6.8	24	77
	50	0.49	1.1	1.9	4.3	13	47
	70	0.41	1.0	1.9	3.7	9.7	33
	90	0.35	1.0	2.0	3.5	8.1	26
0 °C	10	1.3	4.0	9.3	14	17	19
	20	0.61	1.9	6.2	18	35	47
	30	0.47	1.2	3.7	13	36	69
	50	0.41	0.82	2.1	6.8	24	71
	70	0.39	0.76	1.6	4.6	16	56
	90	0.38	0.76	1.5	3.7	12	43

Tabla 5.1: Coeficiente de atenuación del aire, χ, dB/ km, para una presión ambiental de 101,3 kPa, para la propagación del sonido al aire libre.

El coeficiente de atenuación del aire para temperaturas o humedades relativas, que no están tabulados, se pueden obtener mediante interpolación. La Norma ISO 9613-1 proporciona una información amplia sobre los coeficientes de atenuación atmosférica.

5.3.- ECUACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DEL SONIDO AL AIRE LIBRE

En el aire libre, el nivel de presión acústica a una distancia r de una fuente sonora direccional, considerada como puntual, se calcula mediante la expresión:

$$L_p(r) = L_w + 10\log\frac{Q}{4\pi r^2} - A_{combinada} \quad dB \qquad [5.4]$$

$A_{combinada}$ es un término que tiene en cuenta la atenuación que producen factores como el suelo, condiciones atmosféricas, barreras, etc. Las condiciones atmosféricas ambientales, pueden influir de forma importante en el nivel de presión acústica en el lugar de recepción, aún cuando la distancia entre el emisor y el receptor sea relativamente grande. La expresión anterior, teniendo en cuenta la colocación de la fuente sonora respecto al suelo, paredes, techos, etc, la podemos escribir:

$$L_p(r) = L_w + 10\log Q - 11 - 20\log\frac{r}{1m} - 10\log\frac{\Omega}{4\pi} - A_{combinada} \quad dB \qquad [5.5]$$

donde

$$A_{div} = 20\log\frac{r}{1m} + 11 - C \quad dB \qquad [5.6]$$

A_{div}, representa la atenuación debida a la divergencia geométrica del sonido, C es una pequeña corrección función de la temperatura y de la presión atmosférica; r, es la distancia de la fuente emisora al punto de medida. Al doblar la distancia, la atenuación debida a la divergencia aumenta en 6 dB. La atenuación debida a la divergencia no depende de la frecuencia.

En la práctica no es siempre posible conocer el nivel de potencia de la fuente L_w, y se puede medir el nivel de presión acústica en un punto a partir del nivel de presión acústica a una distancia de referencia, $L_{p,\,ref}$.

DI = 10log Q , es indice de directividad de la fuente o ganancia direccional.

Ω, es el ángulo sólido que la fuente tiene disponible para la propagación del sonido.

El termino $A_{combinada}$, se puede descomponer en:

$$A_{combinada} = A_{aire} + A_{suelo} + A_{complementaria} \qquad [5.7]$$

$A_{complementaria}$, puede ser originado por la vegetación, propagación a través de zonas de edificios, etc.

En general cada uno de los términos se evalúan por separado, e independientemente de los demás.

La atenuación resultante de la difracción alrededor de una barrera se tiene en cuenta al calcular la atenuación debida al suelo.

Generalmente es necesario calcular la atenuación en cada banda de octava por separado, pues la atenuación de cada termino de $A_{combinada}$ varía con la frecuencia. La atenuación individual de cada término en un punto dado puede ser positiva o negativa.

5.4.- ATENUACIÓN PRODUCIDA POR EL SUELO

La atenuación del suelo es principalmente el resultado de la interferencia del sonido reflejado por el suelo y el que se propaga directamente ente el emisor y el receptor.

Si se considera una fuente puntual S y un receptor R situados sobre una superficie plana de impedancia acústica Z. La amplitud de la presión en el punto de recepción se puede calcular mediante la expresión

$$p = p_0\left(\frac{e^{-ikr_d}}{r_d} + \frac{R_p e^{-ikr_r}}{r_r} + \frac{(1-R_p)Fe^{-ikr_r}}{r_r}\right) \qquad [5.8]$$

donde

r_d y r_r son respectivamente la distancia recorrida por la onda directa y la onda reflejada, k es el número de onda; p_0 es la amplitud sonora de referencia a un metro de distancia de la fuente sonora en ausencia de suelo. R_p es el coeficiente de reflexión complejo del suelo, que puede ser expresado en función de la impedancia acústica característica del aire $\rho_0 c$ y la impedancia acústica específica del suelo, Z.

$$R_p = \frac{sen\psi - (\rho_0 c / Z)}{sen\psi + (\rho_0 c / Z)} \qquad [5.9]$$

F es una función complicada de la frecuencia, de la distancia, r_d, o r_r, de la impedancia Z y del ángulo ψ.

Sobre un suelo reflectante plano, el sonido llega al receptor desde la fuente por dos caminos, a lo largo del camino directo r_d y a lo largo del camino reflejado desde el suelo r_r.

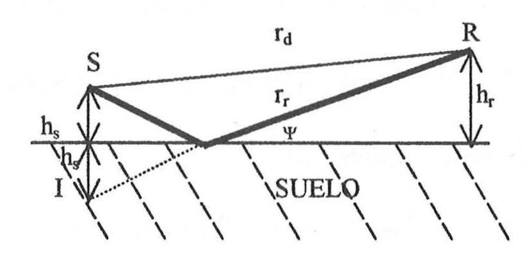


Figura 5.1: Caminos de propagación entre el emisor y el receptor.

La atenuación del suelo, según el procedimiento de cálculo del efecto del suelo de acuerdo con la Norma ISO 9613-2: 1996(E), *Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors*, es debida principalmente a la interferencia entre los sonidos directo y reflejado por el suelo, pero la curvatura de los rayos sonoros asegura que la contribución principal a la atenuación la proporcionan las superficies del suelo próximas al emisor y al receptor.

Método general de cálculo según la Norma ISO 9613-2:1996(E).

La superficie del suelo entre el emisor y el receptor se divide en tres zonas y a cada zona se le asigna un factor de suelo, G.

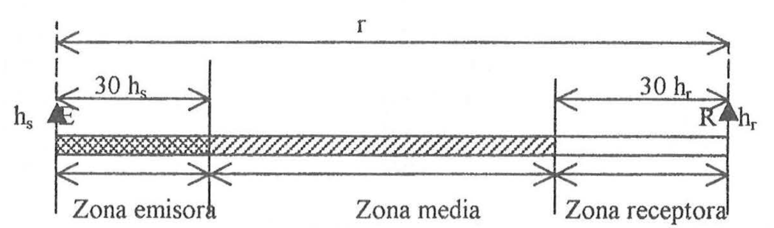


Figura 5.2: Zonas en las que se divide la distancia entre el emisor y el receptor.

a) *La zona emisora*, se extiende desde la fuente emisora en dirección al receptor una distancia $30h_S$, con un valor máximo de r m., (h_S es la altura del emisor sobre el suelo y r es la distancia entre el emisor y el receptor proyectada sobre el plano del suelo).

b) *La zona receptora*, se extiende desde el receptor hacia el emisor una distancia 30 h_r, con una distancia máxima de r m, (h_r es la altura del receptor sobre el suelo).

c) *La zona intermedia*, situada entre las zonas emisora y receptora. Si $r < 30(h_S + h_r)$, entonces las zonas emisora y receptora se solapan y no hay zona intermedia.

Clasificación de las superficies del suelo

a) *Suelos duros*: Pavimentos de asfalto u hormigón, hielo, agua y todas las superficies que tienen porosidad muy baja, por ejemplo suelos bien apisonados como los suelos industriales. El factor de suelo es $G = 0$.

b) *Suelos porosos*: Suelos cubiertos por hierba, árboles u otra vegetación, y otros suelos porosos apropiados para el crecimiento de vegetación, por ejemplo: suelos para uso agrícola. El factor de suelo es $G = 1$

c) *Suelos mixtos*: La superficie del suelo incluye áreas duras y blandas.

No hay valores disponibles para suelos muy blandos, suelo cubierto por una capa de nieve en polvo, agujas de pino, etc.

En cada banda de octava, la atenuación debida al suelo se determina utilizando los valores de la Tabla 5.2, de la siguiente forma:
- 1) Calcular la componente de atenuación A_S para la zona emisora, utilizando el factor G correspondiente a esa zona.
- 2) Calcular la componente de la atenuación A_r para la zona receptora, utilizando su factor de suelo correspondiente.
- 3) Si $r > 30 (h_S + h_r)$, calcúlese la atenuación para la zona intermedia con su factor G.
- 4) La atenuación total para cada banda de octava es la suma de las tres componentes de la atenuación.

$$A_{suelo} = A_S + A_r + A_m \quad [5.10]$$

Frecuencia de banda de octava, Hz	A_s o A_r, dB	A_m, dB
63	-1,5	-3q
125	(a.G) – 1,5	-3q(1-G)
250	(b.G) – 1,5	-3q(1-G)
500	(c.G) –1,5	-3q(1-G)
1000	(d.G) – 1,5	-3q(1-G)
2000	-1,5(1-G)	-3q(1-G)
4000	-1,5(1-G)	-3q(1-G)
8000	-1,5(1-G)	-3q(1-G)

Notas

$$a(h) = 1{,}5 + 3{,}0.e^{-0{,}12(h-5)^2}(1 - e^{-r/50}) + 5{,}7.e^{-0{,}09h^2}(1 - e^{-2{,}8.10^{-6}.r^2})$$

$$b(h) = 1{,}5 + 8{,}6.e^{-0{,}09h^2}(1 - e^{-r/50})$$

$$c(h) = 1{,}5 + 14{,}0.e^{-0{,}46h^2}(1 - e^{-r/50})$$

$$d(h) = 1{,}5 + 5{,}0.e^{-0{,}9h^2}(1 - e^{-r/50})$$

1) Para calcular A_s, $h = h_s$. Para calcular A_r, $h = h_r$
2) $q = 0$ cuando $r \leq 30(h_s + h_r)$

$$q = 1 - \frac{30(h_s + h_r)}{r} \quad \text{cuando } r > 30(h_s + h_r)$$

r es la distancia entre el emisor y el receptor, en metros, proyectada sobre el plano del suelo.

Tabla 5.2: Expresiones que deben de utilizarse para calcular la atenuación del suelo. En cada banda de octava los resultados se expresan en dB. G es el factor de suelo, h_s es la altura del emisor, h_r la altura del receptor y r la distancia entre el emisor y receptor en metros, proyectada sobre el plano del suelo.

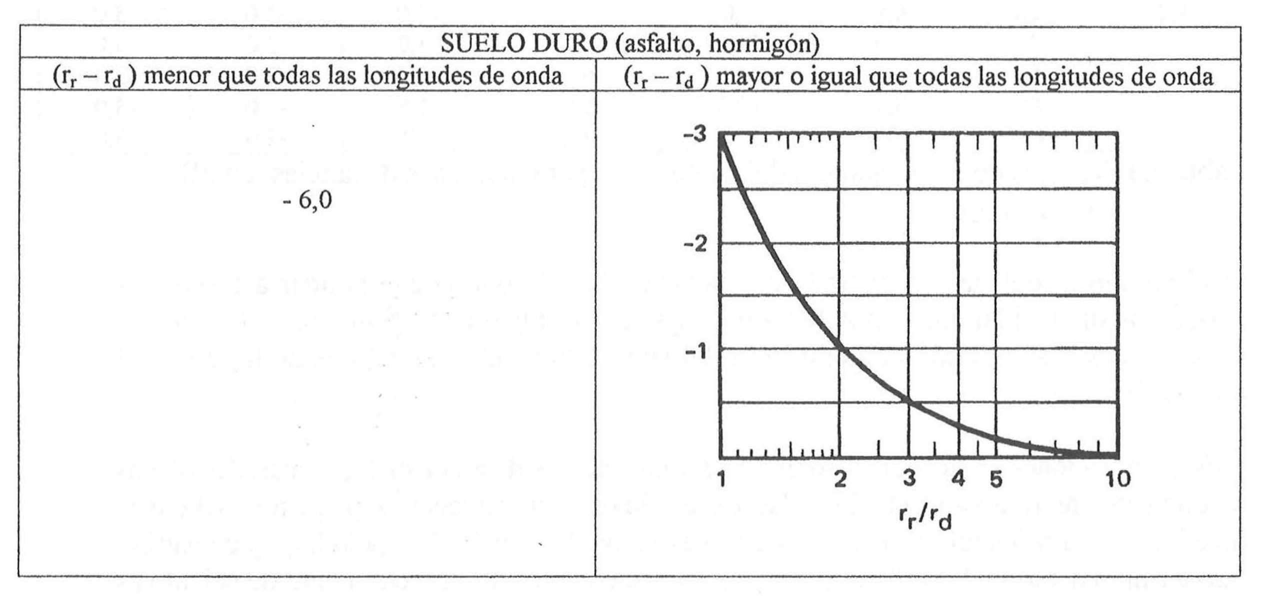
A continuación se presentan algunos resultados para algunas distancias emisor-receptor y alturas de la fuente emisora o del receptor.

Distancia, m	Altura de la fuente o receptor, m				
	0,5	1,5	3,0	6,0	>10,0
	Factor a				
50	1,7	2,0	2,7	3,2	1,6
100	1,9	2,2	3,2	3,8	1,6
200	2,3	2,7	3,6	4,1	1,6
500	4,6	4,5	4,6	4,3	1,6
> 1000	7,0	6,6	5,7	4,4	1,7
	Factor b				
50	6,8	5,9	3,9	1,7	1,5
100	8,8	7,6	4,8	1,8	1,5
> 200	9,8	8,4	5,3	1,8	1,5
	Factor c				
50	9,4	4,6	1,6	1,5	1,5
100	12,3	5,8	1,7	1,5	1,5
> 200	13,8	6,5	1,7	1,5	1,5
	Factor d				
50	4,0	1,9	1,5	1,5	1,5
> 100	5,0	2,1	1,5	1,5	1,5

5.5.- CÁLCULO DE LA ATENUACIÓN DEL SUELO PARA PEQUEÑAS DISTANCIAS. (EMBLENTON, T.F.W, 1982).

Para pequeñas distancias (menores de 100 m), el camino de los rayos sonoros puede ser aproximado por líneas rectas, los valores de la atenuación del suelo vienen dados por la tabla 5.3, en las diferentes bandas de octava para suelos duros, blandos y muy blandos. La distancia entre el emisor y el receptor proyectada sobre el plano del suelo es r.

Cuando la propagación es sobre suelos mixtos, la atenuación para cada banda de octava se determina de la siguiente forma: En primer lugar se calcula la atenuación para suelo duro, después se hace la misma operación para suelo blando. La atenuación del suelo es un valor intermedio de acuerdo con la relación entre suelo blando y duro.



SUELO DURO (asfalto, hormigón)	
$(r_r - r_d)$ menor que todas las longitudes de onda	$(r_r - r_d)$ mayor o igual que todas las longitudes de onda
- 6,0	

SUELO BLANDO o POROSO (hierba, vegetación), h_r =1,8 m							
Altura de la fuente, m	Distancia, m	Frecuencia, Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
0,01	10	-5,7	-5,0	-3,6	-1,4	1,1	4,1
	20	-5,6	-4,6	-1,8	1,9	5,1	8,5
	40	-5,5	-3,9	-1,4	6,7	10,1	13,7
	60	-5,4	-3,3	4,2	9,8	13,2	16,9
	80	-5,4	-2,7	6,8	12,2	15,5	19,3
	100	-5,3	-2,2	9,2	14,0	17,4	21,1
0,3	10	-5,4	-4,3	-0,9	5,9	-2,5	-1,9
	20	-5,4	-4,0	-0,1	6,3	-0,1	-3,0
	40	-5,4	-3,4	2,9	10,2	4,1	-2,9
	60	-5,3	-2,8	5,8	13,1	7,1	-0,4
	80	-5,3	-2,2	8,4	15,3	9,3	1,7
	100	-5,2	-1,7	10,8	17,1	11,1	3,4
1,2	10	-4,0	2,0	0,1	-3,0	-3,0	-3,0
	20	-4,8	-1,9	7,5	-2,7	-3,0	-3,0
	40	-4,9	-2,1	6,9	0,5	-3,0	-3,0
	60	-4,9	-1,6	9,1	2,9	-3,0	-3,0
	80	-4,8	-1,0	11,6	4,8	-2,8	-3,0
	100	-4,8	-0,5	13,8	6,4	-1,5	-3,0

SUELO MUY BLANDO, (nieve, bosque de pinos), h_r =1,8 m							
Altura de la fuente, m	Distancia , m	Frecuencia, Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
0,01	10	-3,1	0,8	3,9	6,0	7,3	7,0
	20	-1,5	5,2	8,6	10,9	12,3	11,9
	40	1,4	11,1	14,0	16,3	17,7	17,3
	60	3,9	14,8	17,3	19,6	21,0	20,7
	80	6,2	17,3	19,7	22,0	23,4	23,1
	100	8,4	19,3	21,6	23,8	25,3	24,9
0,3	10	-2,3	2,8	5,0	-0,8	-3,0	-3,0
	20	-0,8	7,0	9,1	2,9	-2,9	-3,0
	40	2,0	12,8	14,2	7,9	1,4	-3,0
	60	4,6	16,5	17,5	11,2	4,5	-1,3
	80	6,9	19,0	18,2	13,5	6,8	0,8
	100	9,1	21,0	21,7	15,4	8,6	2,6
1,2	10	0,1	4,5	-2,5	-2,5	-2,5	-2,5
	20	0,9	7,0	-0,7	-3,0	-3,0	-3,0
	40	3,6	11,6	3,3	-3,0	-3,0	-3,0
	60	6,3	14,8	6,3	-0,6	-3,0	-3,0
	80	8,7	17,1	8,5	-1,5	-3,0	-3,0
	100	10,9	18,9	10,3	3,2	-2,6	-3,0

Tabla 5.3: Valores de la atenuación del suelo A_{suelo} para pequeñas distancias, en dB (r < 100 m)

Si el ángulo ψ del rayo refractado es mayor de 30°, lo que puede ocurrir a distancias cortas, los suelos blandos y muy blandos llegan a ser muy buenos reflectores del sonido. En estos casos se obtiene la atenuación del suelo utilizando los valores de la tabla 5.3 para suelo duro

Existen situaciones en las que el sonido se refleja además de en el suelo, en paredes planas (coeficiente de reflexión 1), fachadas de edificios con ventanas y pequeños salientes, (coeficiente de reflexión 0,8), etc. En este caso a la atenuación del suelo hay que añadirle otro término debido a las reflexiones sobre estos elementos. El procedimiento de cálculo es idéntico al de la atenuación del suelo.

5.6.- MÉTODO DE CÁLCULO ALTERNATIVO DE LA ATENUACIÓN DEL SUELO CUANDO ÚNICAMENTE INTERESA EL NIVEL DE PRESIÓN SONORA PONDERADO A EN LA RECEPCIÓN.

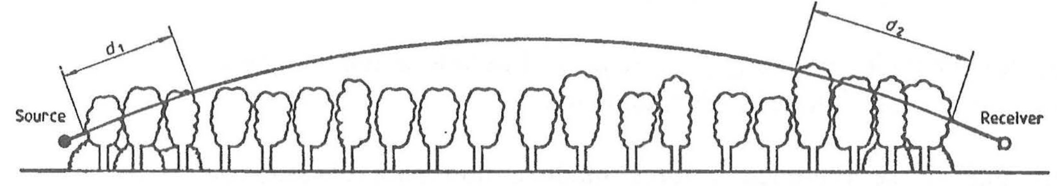
Bajo las condiciones: únicamente interesa el nivel sonoro ponderado A en la recepción, la propagación es sobre suelo poroso, o la mayor parte de él y que los sonidos no son tonos puros. Entonces, la atenuación del suelo es independiente de la frecuencia, y se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$A_{suelo} = 4.8 - \left(\frac{h_s + h_r}{r}\right)\left(17 + \frac{300}{r}\right) \geq 0 \text{ dB} \qquad [5.11]$$

donde r es la distancia entre el emisor y el receptor, en m. Valores negativos de A_{suelo} no tienen significado y se sustituyen por cero. Cuando las distancias son cortas, la ecuación anterior no predice atenuación y es más fiable la expresión [5.10].

5.7. ATENUACION PRODUCIDA POR LA VEGETACION

Los árboles y arbustos son unas barreras muy deficientes para el sonido. Si la vegetación es espesa como para impedir ver a su través e intercepta a las ondas sonoras, entonces se debe de considerar la atenuación que produce, y podemos aceptar los valores en dB o dB/m en cada banda de octava que se muestran en la tabla 5.4. La atenuación puede ser originada por vegetación próxima a la fuente, o próxima al receptor, o por ambas situaciones, como se observa en la figura siguiente.



$d_f = d_1 + d_2$. Para calcular d_1 y d_2 se considera un radio de curvatura de 5 km.
Figura 5.3: Atenuación de una zona de vegetación.

Distancia de propagación, $10 \text{ m} \leq d_f \leq 20 \text{ m}$

Frecuencia Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$A_{vegetación}$,dB	0	0	1	1	1	1	2	3

Distancia de propagación, $20 \text{ m} \leq d_f \leq 200 \text{ m}$

Frecuencia Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$A_{vegetación}$,dB/m	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,12

Tabla 5.4: Atenuación del sonido debido a la vegetación.

Para distancias de propagación superiores a 200 m a través de vegetación densa, se utilizará la atenuación para 200 m. Si los árboles son de hoja caduca, la atenuación únicamente se apreciará cuando hay hojas.

5.8.- ATENUACIÓN PRODUCIDA POR LOS EDIFICIÓS

Cuando el sonido se propaga a través de una zona edificada, los edificios actúan como barreras acústicas. Sin embargo, este efecto puede ser atenuado por la propagación de las ondas acústicas entre los edificios y las reflexiones entre ellos. El efecto combinado de apantallamiento y de reflexiones por los edificios constituye el término $A_{viviendas}$.

Se considera la propagación del sonido a través de una zona muy edificada con casas individuales. El método seguido por la norma ISO 9613-2:1996(E) permite variar la densidad de edificaciones incluyendo áreas urbanas y suburbanas.

Un valor de la atenuación de una casa debido a la presencia de edificios se calcula en primer lugar a partir de la expresión:

$$A_{viviendas} = 0,1.B.d_b \text{ dB} \qquad [5.12]$$

d_b es la longitud del camino acústico a través de la zona de viviendas, se calcula por un procedimiento análogo al del apartado anterior para d_f, atenuación debida a la

vegetación. B es la densidad de edificación a lo largo del camino, se determina mediante la expresión:

B = Área total del suelo edificado/ Área total del suelo.

El valor de la atenuación del sonido $A_{viviendas}$ es el mismo para todas las frecuencias.

La atenuación debida al suelo sin viviendas, A_{suelo}, se calcula a partir de la expresión

$$A_{suelo} = A_s + A_r + A_m \text{ dB}$$

Se comparan los resultados obtenidos por $A_{viviendas}$ y A_{suelo} y el menor se iguala a cero. El otro valor se introduce en la expresión de la atenuación total.

Con el procedimiento anterior se obtienen valores medios, que para el caso de mediciones individuales puede producir importantes desviaciones.

Un caso particular de atenuación del sonido debido a edificios es cuando además hay una fila de edificios cerca de una carretera o una vía de ferrocarril. En este caso a la atenuación producida por la zona de viviendas $A_{vivienda}$, hay que añadirle la atenuación producida por una única fila de edificios, A_{fed}.

$$A_{viviendas\,t} = A_{viviend} + A_{fed} \text{ dB} \qquad [5.13]$$

Una fila de edificios proporciona atenuación sonora si está situada entre la fuente sonora y el receptor. El sonido llega al receptor a través de la parte superior de los edificios y a través de los huecos entre los edificios. Por esta última razón la fila de edificios proporciona menos atenuación que una barrera sólida sin huecos, de la misma altura. Una aproximación a la atenuación de una única fila de edificios viene dada por la expresión

$$A_{fed} = -10.\log\left[1-(p/100)\right] \text{ dB} \qquad [5.14]$$

Donde p es porcentaje de la longitud ocupada por la línea de edificios en la proximidad de la carretera o la vía del ferrocarril. ($p \leq 90$ %).

5.9.- ATENUACIÓN PRODUCIDA POR ZONAS INDUSTRIALES

En zonas industriales las fuentes de ruido pueden ser muy variadas. El valor de la atenuación producida por la zona industrial A_{ind} está muy influenciada por el tipo de industrias localizadas en ella y se recomienda determinar el valor de la atenuación por mediciones de campo. Sin embargo, para una estimación de la A_{ind} se puede utilizar la tabla siguiente.

Frecuencia, Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A_{ind} , dB/m	0	0,015	0,025	0,025	0,02	0,02	0,015	0,015

La atenuación aumenta linealmente con la longitud d_s a través de las instalaciones y plantas industriales. El máximo valor de A_{ind} es de 10 dB.

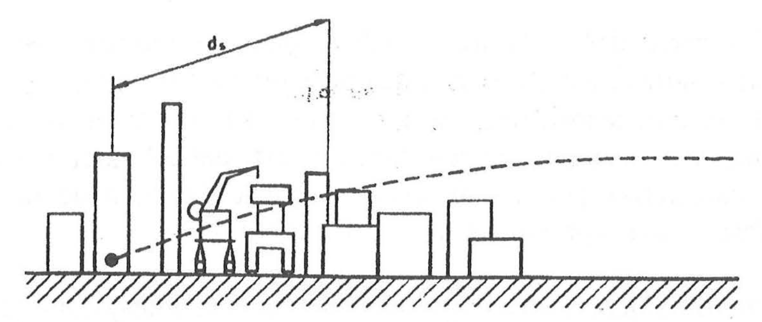


Figura 5.4: Atenuación acústica de una zona industrial.

5.10.- EFECTOS METEOROLÓGICOS

La propagación del sonido cerca del suelo para distancias emisor-receptor menores de 100 m son prácticamente independientes de las condiciones atmosféricas, la atmósfera puede considerarse como homogénea. Para distancias mayores su efecto puede ser importante. La humedad relativa y la temperatura tienen un gran efecto en la atenuación del sonido a altas frecuencias y en grandes distancias. Sin embargo, el principal efecto es la refracción producida por los gradientes verticales de viento y temperatura.

5.10.1.- EFECTOS DE LA TEMPERATURA

La velocidad del sonido en el aire esta determinada por la velocidad del viento y por la temperatura, pues el efecto de la humedad relativa se puede despreciar. La velocidad del sonido en el aire se puede determinar mediante la expresión

$$c = c_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} \qquad [5.15]$$

donde T es la temperatura absoluta y c_0 es la velocidad a la temperatura T_0.

La velocidad resultante es la suma vectorial de la velocidad c y la velocidad del viento, siendo c un vector normal al frente de ondas. En cada instante de tiempo las ondas sonoras se propagan en una atmósfera en la que la temperatura y la velocidad son funciones de la posición, y en consecuencia sufren refracción.

La atmósfera está en un continuo estado de movimiento y agitación, mediante la circulación de corrientes de aire, desde las regiones bajas a las altas.

Suponiendo que las masas de aire se mueven adiabáticamente de una altura a otra, la temperatura está relacionada con la distancia al suelo mediante la expresión:

$$\frac{dT}{dh} = -\frac{\gamma - 1}{\gamma}\left(\frac{g}{R}\right) = -\Gamma \qquad [5.16]$$

donde g, es la aceleración de la gravedad ; R , la constante de los gases

γ, el coeficiente adiabático ; h, la altura sobre el suelo

Γ, el gradiente térmico adiabático

El gradiente térmico adiabático es aproximadamente de 1°C por cada 100 m

La expresión anterior cerca del suelo no es válida, pues las temperaturas son muy variables y sometidas a variaciones cíclicas. En la proximidad del suelo, el gradiente es mucho mayor que Γ, está muy influenciado por la hora del día, es negativo desde un poco después del amanecer hasta un poco antes de la puesta del sol, mientras que en las horas nocturnas se caracteriza por una inversión térmica. La capa de inversión se extiende hasta una distancia de aproximadamente 100 m del suelo.

Los gradientes, negativo durante el día y positivo (inversión térmica) durante la noche se pueden entender mediante las siguientes consideraciones. El aire es relativamente transparente para la mayor parte de la energía radiada por el sol. Durante el día, esta energía incide sobre la superficie terrestre calentándola. La temperatura que alcanza la superficie del suelo depende de la naturaleza de este. La temperatura del aire en contacto con la superficie aumenta y al estar más caliente que el aire a una cierta distancia del suelo, el aire se eleva. El calor que absorbe la capa de aire en contacto con la atmósfera se eleva a alturas superiores mediante convección. Por esta razón puede existir un gradiente de temperatura negativo durante las horas diurnas, siendo mayor cuanto más pequeña sea la altura. Poco antes de la puesta del sol, la superficie del suelo comienza a enfriarse, y consecuentemente el aire en contacto con él, y se establece un gradiente de temperaturas positivo en la proximidad del suelo. A alturas superiores, el gradiente continua siendo negativo, de manera que se forma una capa de inversión. El nivel superior de esta capa de inversión se va elevando durante la noche, según se enfría el aire del nivel inferior. Esta zona de inversión térmica se caracteriza por su relativa estabilidad, ya que la densidad disminuye con la altura. De lo anterior podemos deducir que en días con cielo cubierto el gradiente térmico será siempre pequeño.

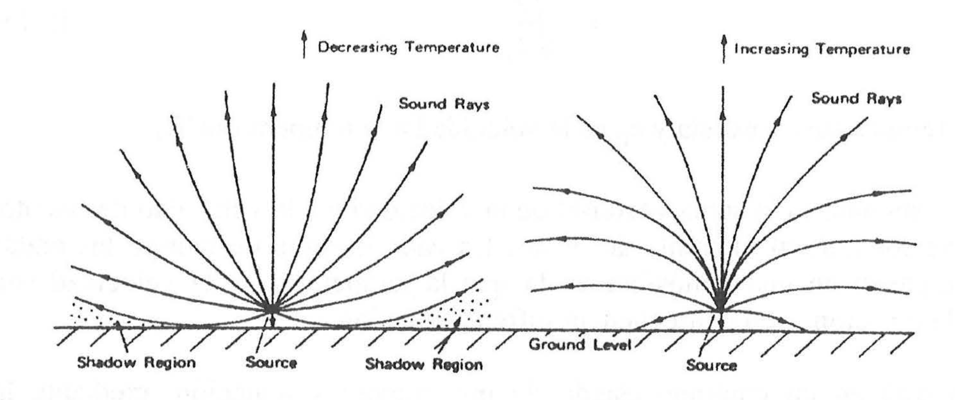


Figura 5.5: Efecto de la temperatura en la propagación de las ondas sonoras.

Efecto de la niebla

Es normal que el nivel de presión sonora, en un punto alejado de una fuente sonora, sea superior en un día con niebla que en otro despejado. La atenuación de la niebla se puede considerar prácticamente nula. La ausencia de atenuación con la niebla se puede atribuir a la ausencia de viento y a la homogeneidad de la temperatura, lo que hace que no haya sombras sonoras.

5.10.2.- EFECTO DEL VIENTO

Básicamente la influencia del viento es debida a la existencia de un gradiente de velocidad del viento con la altura sobre el terreno. Normalmente la velocidad del viento aumenta con la separación del suelo, esto origina una región de sombra acústica en el lado desde el que sopla el viento, y si el receptor se encuentra más lejos de la fuente en la dirección del viento, el nivel sonoro se incrementa de forma apreciable.

El perfil del viento a pequeñas alturas está determinado por la rugosidad de la superficie del suelo y puede ser expresado de forma aproximada por

$$v(h) = v_0 \cdot h^{0,15} \text{ m/s} \qquad [5.17]$$

donde v(h) es la velocidad del viento a una altura h, v_0 es una constante, h generalmente 10 m.

La velocidad del viento varía con la altura según la expresión

$$\frac{dv}{dh} = 0,15\frac{v(h)}{h} \text{ s}^{-1} \qquad [5.18]$$

La figura 5.6 muestra el efecto del viento en la propagación del sonido, se observa una zona de sombra sonora, preferentemente durante el día en la zona opuesta a la dirección del viento de propagación del viento.

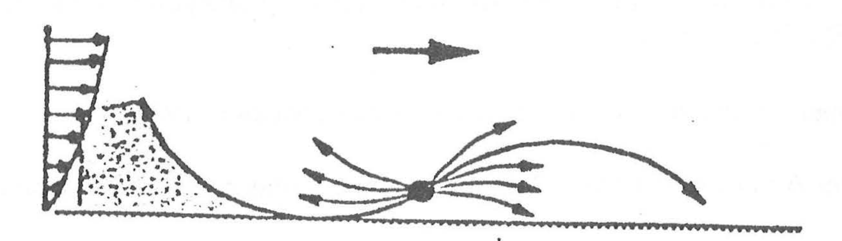


Figura 5.6: Efecto del viento en la propagación del sonido.

Desde el foco sonoro y en sentido opuesto a la dirección del viento se suman los efectos del viento y la temperatura, originando en los rayos sonoros una curvatura hacia arriba. Por otra parte, en la dirección del viento se restan los efectos y la curvatura puede ir hacia arriba o hacia abajo según cual de los efectos sea predominante. Durante la noche, en la dirección del viento se suman los gradientes de viento y temperatura y producen una curvatura hacia abajo, en sentido opuesto al viento se restan los dos efectos.

La Norma ISO 9613-:1996(E) indica bajo que condiciones se deben de realizar las medidas del ruido ambiental teniendo en cuenta las condiciones ambientales.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Beranek, L., Noise and Vibration Control Engineering. Principles and Applications, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992.

[2] Blauert, J., Spatial Hearing, MIT Press, Cambridge, Mass., 1997.

[3] Cremer;Müller. Principles and Applications of Room Acoustics. Vol. I, II, Applied Science Publishers. London, 1982.

[4] Embleton, T.F.W. Sound Propagation outdoors – Improved predictions schemes for the 80's. Noise Control Engineering Journal, Vol 18, nº 30, 1982.

[5] Fahy, F., Foundations of Engineering Acoustics. Academic Press, San Diego, 2001.

[6] Harris, C., Acoustical Measurements and Noise Control, Mc Graw Hill, New York, 1991. Existe una versión en español.

[7] ISO 9613-1:1993, Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors-Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.

[8] ISO 9613-2:1996, Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors-Part 2: General method of calculation.

[9] Kinsler; Frey; Coppens. Fundamentos de Acústica, Limusa, Mexico, 1988.

[10] Kuttruff, H. Room Acoustics, Elsevier Applied Science, London, 1991. Reprinted 1999 by Spon Press.

[11] Lara, Sthepens,. Noise Pollution, John Wiley &Sons, London, 1986.

[12] Nelson,P. Transportation Noise. Reference Book. Butterworths, London, 1987.

[13] Pearsons K. S., Bennet R.L., Fidell, S. , Speech levels in various noise environments. Report EPA – 600/1-77-025, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., mayo, 1977.

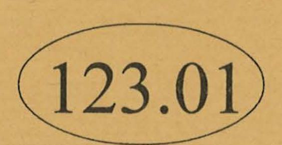
[14] Pierce D., Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications, McGraw-Hill, New York. 1981.

[15] Rathe E.J., "Note on Two Common Problems of Sound Propagation", J. Sound Vib. 10(3), 472-476, 1969.

[16] Spoor A. Int. Audiol. Vol 6, p. 48, 1967.

[17] Taylor W and atl. J.Acoust. Soc. Am., V 38, p. 113, 1965.

CUADERNO



CATÁLOGO Y PEDIDOS EN
http://www.aq.upm.es/of/jherrera
jherrera@aq.upm.es

